نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز
جلد ۵، شماره ۳، ۱۳۹۲، صفحات ۱۷۹-۱۸۹

Journal of Watershed Engineering and Management
Volume 5, Issue 3, 2013, Pages 179-189

ارزیابی مدل SWAT2009 در شبیه‌سازی بیلان آبی

آزاده جباری*[۱]، مجید حسینی[۲] و امیر خسروجردی[۳]

[۱] دانشجوی دکترا، دانشگاه لرستان، [۲] استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و [۳] استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۱/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۶/۲۵

چکیده

به‌دلیل افزایش جمعیت و مشکلات عدیده‌ای که در برنامه‌ریزی منابع آب منطقه سنجابی، واقع در استان کرمانشاه ایجاد شده است، در پژوهش حاضر، به بررسی بیلان آبی در این منطقه با استفاده از مدل SWAT2009، پرداخته شد. بدین منظور، پارامترهای این مدل، با به‌کارگیری لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز مدل، در دوره آماری ۲۰۰۴-۱۹۹۵، در حوزه آبخیز سنجابی، با استفاده از برنامه SUFI2 حساسیت‌سنجی و واسنجی شد. حساسیت پارامترهای جریان با استفاده از معیارهای P-Value و t-Stat در SUFI2 تعیین شد. پس از واسنجی پارامترهای حساس، مدل برای دوره آماری ۲۰۰۷-۲۰۰۵ اعتبارسنجی شد. نتایج ارزیابی مدل SWAT، مقادیر NS (ناش-ساتکلیف)، ضریب تبیین (R^2)، خطای نسبی میانگین قدرمطلق (MARE) و درصد تفاوت (D) را به‌ترتیب برای دوره واسنجی معادل ۰/۷۸، ۰/۷۸، ۰/۲ و ۰/۲- و برای دوره اعتبارسنجی برابر با ۰/۷۴، ۰/۸۶، ۰/۳ و ۰/۰۱ نشان داد. نتایج حاکی از دقت مطلوب مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب بوده و کم برآوردی ناچیزی در دوره واسنجی و بیش برآوردی بسیار کم در دوره اعتبارسنجی را نشان می‌دهد. بیلان آبی در این مدل، به‌صورت مقدار آب موجود در خاک شبیه‌سازی شد، به‌طوری که بیلان آبی در سال‌های ۲۰۰۵ (سال معمولی)، ۲۰۰۶ (سال تر) و ۲۰۰۷ (سال خشک) منفی به‌دست آمد. با این حال، بیلان آبی ماهانه در فصل‌های پاییز و زمستان در این سه سال مثبت و در فصل‌های بهار و تابستان منفی بوده است. نتایج نشان داد بیشتر هدر رفت آب در این حوضه به‌وسیله تبخیر و تعرق صورت می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی، پارامتر حساس، حساسیت‌سنجی، حوزه آبخیز سنجابی، واسنجی

مقدمه

با توجه به این‌که کشور ما جز مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود و بیشتر رودخانه‌ها در مناطق خشک قرار گرفته‌اند و همچنین، وضعیت بحرانی برداشت آب‌های زیرزمینی و لزوم توجه بیشتر به آب‌های سطحی، آگاهی از وضعیت بیلان آبی حوزه‌های آبخیز کشور، یکی از راهکارهای مؤثر در مدیریت منابع آب با توجه به شرایط کمبود آب است. بدین منظور، مدل‌های هیدرولوژیکی متعددی برای تعیین بیلان آبی به‌کار رفته است که ازجمله آن‌ها ابزار ارزیابی خاک و آب[۱] می‌باشد که یک مدل هیدرولوژیکی در مقیاس حوزه آبخیز است و ویرایش‌های مختلف آن به‌وسیله سازمان پژوهش‌های کشاورزی آمریکا توسعه داده شده است.

[1] Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

* مسئول مکاتبه: jabary.az@gmail.com

این مدل قابلیت اتصال به نرم‌افزارهـای سامانه اطلاعات جغرافیایـی را دارا بوده و محدودیتـی از نظـر ورود حجـم وسیعـی از اطلاعـات در مورد حوضه‌های بزرگ وجود ندارد. ورودی‌های این مدل شامل اطلاعات اقلیمی، هواشناسی، توپوگرافی، کاربری اراضی و خاک منطقه است (Misra و Rose، ۱۹۹۵).

در ویرایش SWAT2009، روابط محاسبه انتقال میزان باکتری‌ها (آلودگی‌ها) به‌وسیله جریان آب و رسوب، توسعه بیشتری یافته و سناریوهای مختلف پیش‌بینی شرایط آب و هوایی نیز اضافه شده است. همچنین، یک مولد[1] برای تولید داده‌های باران در زمان کم‌تر از روزانه[2] اضافه شده است. همچنین، پارامترهای حفاظتی که در محاسبه CN روزانه استفاده می‌شود، به محتوای آب خاک یا تبخیر و تعرق گیاه بستگی دارد. در این ویرایش، محاسبه رسوبات خشک و تر نیترات و آمونیوم توسعه یافته است (Neitsch و همکاران، ۲۰۱۱).

با اجرای مدل SWAT در حوضه گودوین در شمال می‌سی‌سی‌پی، Bingner و همکاران (۱۹۹۷) گزارش کردند که انتقال رسوب نسبت به تعداد زیرحوضه‌ها حساس است، ولی رواناب سطحی نسبت به تعداد زیرحوضه‌ها غیرحساس می‌باشد. همچنین، پیشنهاد نمودند تحلیل حساسیت باید برای کاربری اراضی، شیب سطحی و طول شیب برای زیرحوضه‌های متفاوت انجام شود، تا تعداد زیرحوضه‌هایی که باید در مدل‌سازی استفاده شود، مشخص شود.

همچنین، در پژوهش Manguerra و Engel (۱۹۹۸) مشکلات مهم پارامترسازی در جریان مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه، برای برآورد رواناب حوضه با استفاده از مدل SWAT گزارش و توضیح داده شد که چگونه می‌توان اجرای مدل و واسنجی پارامترها را بدون مواجه شدن با سختی، انجام داد. مطالعات وی بر روی حوضه‌های مصنوعی و واقعی در آمریکا انجام شد. نتایج این پژوهش اطلاعات مفیدی برای بهبود اجرای مدل SWAT در موضوعات پیش‌بینی جریان آبراهه‌ای ارائه می‌دهد.

در مطالعه Tripathi و همکاران (۲۰۰۴) که در شرق هند برای اندازه‌گیری مقدار رواناب و رسوب در حوضه کوچک کشاورزی انجام دادند، از مدل SWAT استفاده شد. برای ارزیابی کارایی مدل از ضریب R^2 استفاده شد و مقدار این ضریب در شبیه‌سازی باران ۹۴ درصد، برای رواناب ۷۹/۷ درصد و برای رسوب ۸۰/۷ درصد به‌دست آمد. همچنین، Abbaspour و همکاران (۲۰۰۷) برای شبیه‌سازی تمام فرآیندهایی که روی کیفیت آب، رسوب و چرخه عناصر در حوضه رودخانه تور در کشور سوئیس مؤثرند، از مدل SWAT استفاده کردند. نتایج نشان داد شبیه‌سازی رواناب و نیترات بسیار خوب و شبیه‌سازی رسوب و کل فسفر به‌طور نسبی خوب است.

در ایران نیز Ababaei (۲۰۰۸) عملکرد مدل SWAT را در رابطه با شبیه‌سازی جریان رودخانه زاینده‌رود ارزیابی نمود. در مرحله واسنجی مقادیر ضریب NS[3] بین ۵۹/۴ تا ۷۹ درصد و ضریب R^2 بین ۷۲/۶ تا ۸۲ درصد در ایستگاه‌های مختلف متغیر بودند که با توجه به نتایج مطالعات گذشته و کیفیت داده‌های استفاده شده، قابل قبول ارزیابی شد. در مرحله اعتبارسنجی مدل، مقادیر پارامترهای ضریب NS و R^2 به‌ترتیب در حدود ۶۰/۱ تا ۶۹/۱ و ۶۴/۷ تا ۷۰/۸ درصد برای ایستگاه‌های مختلف برآورد شد. ایشان کاهش کیفیت شبیه‌سازی مدل در دوره اعتبارسنجی را به تفاوت قابل ملاحظه بین شرایط اقلیمی دوره واسنجی (۱۹۹۵-۱۹۹۲) و اعتبارسنجی (۱۹۹۷-۱۹۹۶) وابسته دانست.

Faramarzi و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه‌ای با استفاده از مدل SWAT در کنار SUFI2[4] برخی اجزای بیلان آب را در کل ایران شبیه‌سازی کرده و ارتباط آن‌ها را با تولید گندم، با درنظر گرفتن عملکرد سدها و اقدامات آبیاری اراضی کشاورزی بررسی کردند که نتایج برای اکثر رودخانه‌های کشور قابل قبول بود. همچنین، نتایج ایشان نشان داد، عملیات آبیاری اثر معنی‌داری بر بیلان آب در استان‌های دارای کشاورزی آبی دارد.

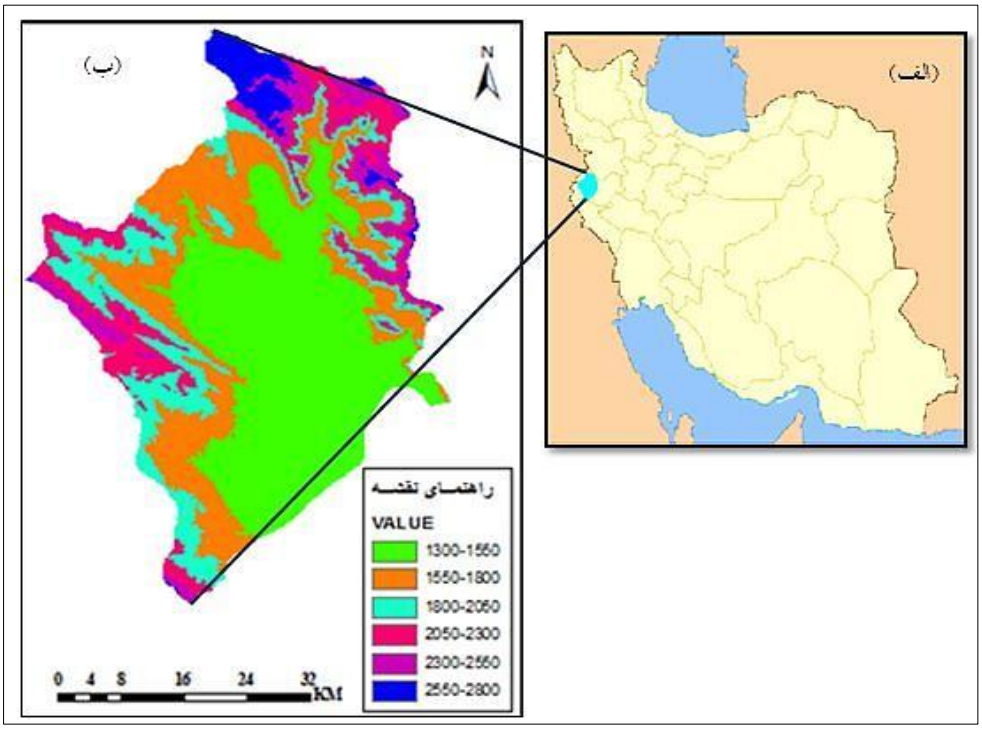
[1] Generator
[2] Subdaily
[3] Nash-Sutcliffe
[4] Sequential Uncertainty Fitting Ver. 2

Saeidi (۲۰۱۱) نیز شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه بالادست سد پیشین استان سیستان و بلوچستان را با استفاده از مدل SWAT مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان از برتری مدل واسنجی شده با پارامترهای توزیعی نسبت به مدل واسنجی شده با پارامترهای متمرکز داشته است. نتایج این پژوهش نشان از اثرات قابل توجه تغییر اقلیم بر رواناب منطقه مورد مطالعه دارد.

با توجه به نتایج مطلوب شبیه‌سازی‌های مطالعات پیشین و توانایی بالای مدل SWAT در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی، همچنین، از آن‌جاکه سازگاری این مدل در تمام نقاط آب و هوایی ایران بررسی نشده و به‌دلیل افزایش جمعیت و مشکلاتی که در برنامه‌ریزی منابع آب منطقه سنجابی ایجاد شده، پژوهش حاضر به‌دنبال واسنجی نمودن پارامترهای مورد نیاز این مدل در حوزه آبخیز سنجابی واقع در استان کرمانشاه و شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و برآورد بیلان آبی در این حوضه با استفاده از مدل SWAT2009 می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: از لحاظ تقسیمات جغرافیایی منطقـه سنجابی جزء استان کرمانشاه بوده و از نظر هیدرولوژی یکی از زیرحوضه‌های حوزه آبخیز کرخه محسوب می‌شود. حوزه آبخیز سنجابی در شمال‌غربی حوضه رودخانه قره‌سو قرار دارد و ۱۲۳۰ کیلومترمربع وسعت دارد. بیشترین ارتفاع در این حوضه حدود ۲۸۰۰ متر و کمترین ارتفاع حدود ۱۳۰۷ متر می‌باشد. رودخانه اصلی این حوضه رودخانه دوآب مرک می‌باشد که از شاخه‌های رودخانه قره‌سو بوده و از جنوب‌شرقی حوضه قره‌سو سرچشمه گرفته است و سراسر طول دشت را پیموده و در منتهی‌الیه شمال‌غربی به‌طرف شمال منحرف و به رودخانه قره‌سو می‌ریزد. حوضه ماهیدشت در جنـوب و حوضـه کامیاران و کرمانشاه در شرق این حوضه واقع شده است. شکل ۱ موقعیت حوزه آبخیز سنجابی در ایران و نواحی مختلف ارتفاعی حوضه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز سنجابی در نقشه ایران (الف) و نقشه طبقات ارتفاعی حوزه آبخیز سنجابی (ب)

روش پژوهش: برای شروع کار با مدل SWAT2009 ابتدا نقشه رقومی ارتفاعی[۱] (DEM) حوزه آبخیز

سنجابی به محیط نرم‌افزار مدل در ArcGIS فراخوانده شد. شاخص‌های فیزیوگرافی مختلف حوزه آبخیز از مدل رقومی ارتفاعی زمین قابل استخراج هستند. با معرفی نقشه DEM حوضه، ابتدا شبکه آبراهه‌های حوضه به‌وسیله مدل SWAT تعیین و ترسیم شد و برای هر آبراهه، نقطه خروجی آن مشخص شد. سپس، محدوده و مرز حوزه آبخیز با توجه به توپوگرافی و شبکه آبراهـه‌ها ترسیم و در پایان حوضه به زیرحوضه-های مختلف تقسیم‌بندی شد. سپس، مـدل SWAT با استفـاده از نقشـه‌های خاک، کاربـری اراضـی حوضـه که به مدل معرفی شده است و همچنین، نقشه شیب حوضه (تشکیل شده به‌وسیله مدل با استفاده از نقشه DEM) زیرحوضه‌ها را به واحدهای پاسخ هیدرلوژیکی[۲] هیدرلوژیکی[۲] (HRU) تقسیم‌بندی نمود. واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی به قسمت‌هایی از زیرحوضه که دارای ویژگی‌های همگنی از نظر خاک، پوشش گیاهی و مدیریت هستند، اطلاق می‌شود. مقدار آب خاک، رواناب سطحی، بار رسوب، رشد گیاه و عملیات مدیریتی برای هر واحد پاسخ هیدرولوژیکی جداگانه شبیه‌سازی می‌شود که باعث افزایش دقت تخمین مدل می‌شود.

پس از تشکیل حوضه و واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی، داده‌های هواشناسی مورد نیاز مدل SWAT، شامل اطلاعات بارش و درجه حرارت روزانه ایستگاه‌های مشخص در دوره آماری ۲۰۰۴-۱۹۹۲، به مدل معرفی و با انتخاب سه سال اول به‌عنوان اجرای مقدماتی مورد استفاده قرار گرفت. سپس، خروجی این مدل با برنامه SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CUP[۳] مرتبط شد و پارامترهای مهم مدل SWAT2009 برای حـوزه آبخیز سنجـابی، به کمک برنامـه SUFI2 در دوره آمـاری ۲۰۰۴-۱۹۹۵، حساسیت‌سنجی و پارامترهای حساس‌تر مشخص و واسنجی شدند و مقادیر بهینه آن‌ها تعیین شد. پس از واسنجی، مدل برای دوره آماری ۲۰۰۷-۲۰۰۵، اعتبارسنجی شد و در ادامه، نتایج حاصله با استفاده از معیارهای آماری ضریب ناش-ساتکلیف (NS)، ضریب تبیین[۴] (R^2)، خطای نسبی میانگین قدرمطلق[۵] (MARE) و ضریب درصد تفاوت[۶] (D) برای هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی تحلیل آماری شد و در نهایت، بیلان آبی برای یک سال خشک، معمولی و تر تعیین شد. معیارهای ارزیابی به‌صورت روابط (۱) تا (۴) محاسبه شد (Rezaei، ۲۰۰۰):

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_{m,i} - Q_s)_i^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \overline{Q_m})^2} \quad (۱)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_i (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (۲)$$

$$MARE = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| \frac{Q_s}{Q_o} - 1 \right|}{n} \quad (۳)$$

$$D = \frac{\sum_i Q_s - \sum_i Q_o}{\sum_i Q_o} \quad (۴)$$

که در آن‌ها، $\overline{Q_m}$ میانگین دبی مشاهده‌ای برحسب مترمکعب بر ثانیه، Q_s نشان‌دهنده دبی محاسباتی برحسب مترمکعب بر ثانیه، $Q_{m,i}$ و Q_o مقادیر مشاهده شده دبی در طول دوره شبیه‌سازی و i تعداد داده‌ها می‌باشد.

چرخه هیدرولوژیکی در مدل SWAT: چرخه هیدرولوژیکی شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل SWAT2009 براساس رابطه بیلان آب به‌صورت رابطه ذیل می‌باشد (Neitsch و همکاران، ۲۰۰۲):

$$SW_t = Sw_o + \sum_{i=1}^{t} \left(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw} \right) \quad (۵)$$

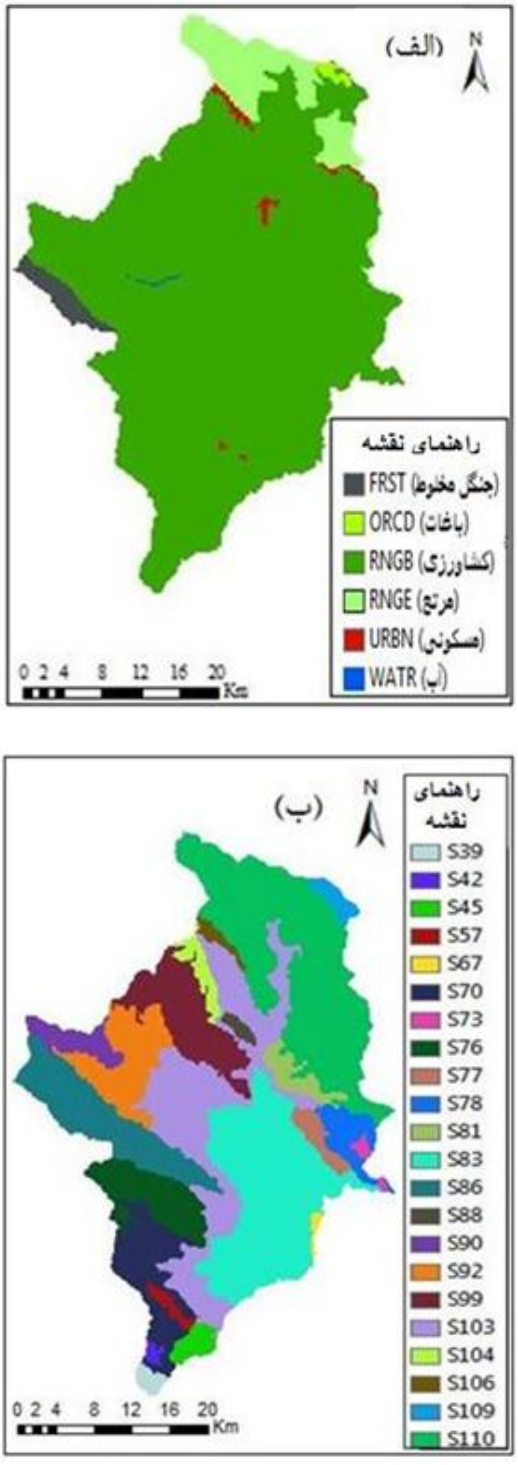
که در آن، SW_t مقدار نهایی آب موجود در خاک برحسب میلی‌متر، SW_o مقدار اولیه آب موجود در خاک برحسب میلی‌متر (تا عمق ۳۰ سانتی‌متری)، t زمان برحسب روز، R_{day} مقـدار بارش در روز i برحسب میلی‌متر، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی در روز i برحسب میلی‌متر، E_a مقدار تبخیر و تعرق واقعی در روز i برحسب میلی‌متر، W_{seep} مقدار آب نفوذی به منطقه قشری در پروفیل خاک در روز i برحسب میلی‌متر و Q_{gw} جریان آب زیرزمینی خروجی به رودخانه در روز i برحسب میلی‌متر است.

[1] Digital Elavation Model
[2] Hydrological Response Unit
[3] SWAT-Calibration and Uncertainty Programs
[4] Coefficient of Determination
[5] Mean Absolute Relative Error
[6] Percent Difference

ورودی‌های مدل SWAT: در پژوهش حاضر از مدل رقومی راداری با پیکسل ۸۵ در ۸۵ متر با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ برای نقشه DEM در حوزه آبخیز سنجابی استفاده شد (شکل ۱-ب). همچنین، نقشه کاربری اراضی حوضه و نقشه خاک حوضه از سازمان جهاد کشاورزی استان کرمانشاه تهیه و به مدل معرفی شد. شکل ۲، دو نقشه مذکور را در منطقه سنجابی نشان می‌دهد. در این پژوهش با استفاده از سه نقشه کاربری اراضی، نوع خاک و شیب حوضه، مدل SWAT تعداد ۲۹ زیرحوضه و ۴۵۶ واحد پاسخ هیدرولوژیکی در حوضه سنجابی تشکیل داد. سپس، آمار بارندگی روزانه و حداکثر و حداقل دمای روزانه ایستگاه‌های داخل و خارج نزدیک حوضه، در دوره ۱۶ساله ۲۰۰۷-۱۹۹۲ به مدل وارد شد. جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد.

SUFI2: در سال‌های اخیر مدل‌سازی معکوس[1] (IM)، روشی معمول برای واسنجی مدل‌ها شده است. از آن‌جایی‌که انتخاب مقادیر مختلف برای پارامترهای مدل و واسنجی آن‌ها محدود بوده و روشی وقت‌گیر و پرهزینه است، مدل‌سازی معکوس به‌عنوان جایگزینی مناسب برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت استفاده می‌شود. برنامه SUFI2 در بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP در واقع معکوس مدل SWAT عمل می‌کند، به این معنی که با گرفتن داده‌های مشاهده‌ای و همچنین، محدوده مجاز پارامترهای مدل SWAT که در واسنجی نمودن مدل نسبت به حوضه مطالعاتی نقش دارند، مانند شماره منحنی خاک، میزان دمای ذوب برف و بسیاری پارامترهای دیگر، حساس‌ترین پارامترها را مشخص و میزان بهینه این پارامترها را برآورد می‌نماید (Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۴).

تحلیل حساسیت شامل وارد کردن یک دامنه از مقادیر برای ورودی‌های خاص و مشاهده تغییرات در مقادیر خروجی مدل است. متغیری که تغییرات کم آن باعث تغییرات زیادی در خروجی مدل می‌شود، متغیر حساس نامیده می‌شود. به‌دلیل تأثیر این نوع متغیرها بر خروجی‌های مدل، توجه زیادی در محاسبه و اندازه‌گیری آن‌ها باید صورت گیرد. تحلیل حساسیت روش مناسبی برای تعیین رفتار مدل در مقابل ورودی‌های آن می‌باشد (Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۷).



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی (الف) و نقشه خاک‌شناسی حوزه آبخیز سنجابی (ب)

[1] Inverse Modeling

جدول ۱- ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در منطقه مورد مطالعه

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع ایستگاه
بوانه	باران‌سنجی	۶۶۰۲۰۴	۳۸۱۰۱۱۰	۱۲۷۴
دوآب مرک	هیدروکلیماتولوژی	۶۶۳۶۲۷	۳۸۲۴۵۸۶	۱۲۹۰
روانسر	سینوپتیک	۶۵۱۰۹۰	۳۸۴۲۸۶۲	۱۳۷۹
زکریای سنجابی	باران‌سنجی	۶۵۱۱۸۱	۳۸۳۷۳۱۷	۱۳۴۲
گهواره	باران‌سنجی	۶۳۰۳۱۸	۳۸۰۰۰۲۵	۱۵۲۰
نهرآبی	باران‌سنجی	۶۴۳۵۴۵	۳۸۳۷۱۹۵	۱۳۷۰

در برنامه SUFI2 حساسیت پارامترها با استفاده از دو معیار P-Value و t-State تعیین می‌شود. معیار p-Value نشان‌دهنده اهمیت حساسیت پارامتر است که هرچه معیار به صفر نزدیک‌تر باشد، پارامتر برای مدل مهم‌تر است و معیار t-Stat اندازه حساسیت را نشان می‌دهد که هرچه بزرگ‌تر باشد، حساسیت پارامتر بیشتر می‌باشد (Abbaspour و همکاران، ۱۹۹۷).

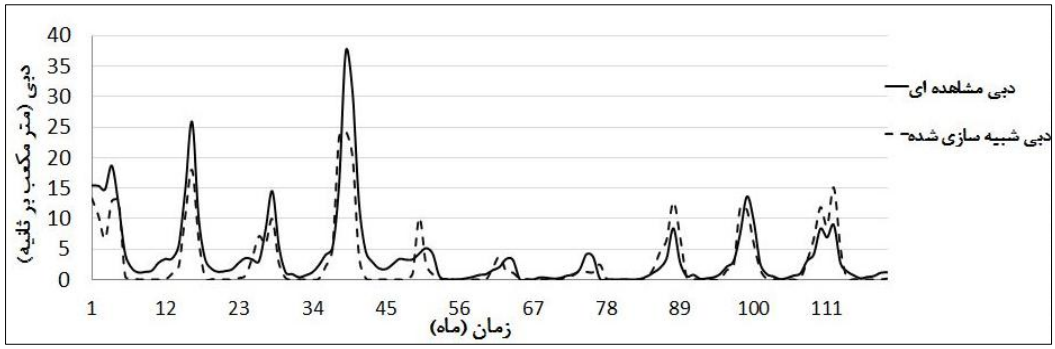
در SUFI2، برنامه در ابتدا با پیش فرض یک محدوده بازه بزرگ برای پارامترها (حد بالا و پایین این دامنه را براساس تجربیات، آزمایش‌ها و یا اندازه‌گیری‌های انجام شده در مطالعات قبلی و منابع علمی انتخاب می‌شود) و یک محدوده عدم قطعیت زیاد برای پارامترها شروع به‌کار می‌کند. عدم قطعیت خروجی مدل به‌وسیله عدم قطعیت تخمین ۹۵ درصد که در سطح ۲/۵ و ۹۷/۵ درصد تابع توزیع[1] متغیر خروجی که با روش نمونه‌برداری لاتین هایپرکیوب[2] از دامنه مذکور نمونه‌برداری می‌شود، محاسبه می‌شود. به‌همین ترتیب، در گام‌های بعدی با اصلاح محدوده پارامترهای ورودی و کوچک‌تر کردن این محدوده به‌سمت کوچک نمودن محدوده PPU[3] ۹۵ و جواب یکتا پیش می‌رود. در این برنامه، دامنه پارامترهای گام قبل با توجه به محاسبات ماتریس تحلیل حساسیت (براساس معادله ژاکوبین[4]) و معادله ماتریس حسیان[5] تصحیح می‌شود. محدوده پارامترها به‌گونه‌ای تصحیح می‌شوند که محدوده مجاز پارامترهای جدید همیشه کوچک‌تر از محدوده قبلی است، به‌طوری‌که این روند به‌سمت بهترین شبیه‌سازی پیش می‌رود (Abbaspour و همکاران، ۱۹۹۷).

نتایج و بحث

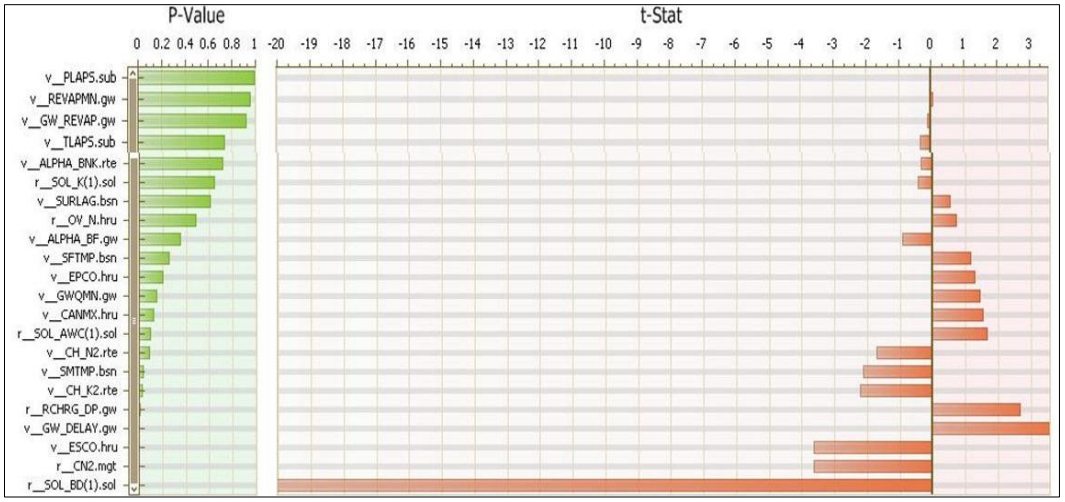
مدل SWAT2009 در نرم‌افزار ArcGIS 9.3، بر اساس آمار سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۴ با انتخاب سه سال ۱۹۹۴-۱۹۹۲ به‌عنوان اجرای مقدماتی مدل، مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۳). در مدل SWAT پارامترهای متعددی در حجم و جریان حداکثر حوضه نقش دارند و بعضی از آن‌ها بر یکدیگر اثر متقابل و خنثی‌کننده دارند که در این پژوهش با توجه به مطالعات پیشین، ۲۲ پارامتر مؤثر در جریان انتخاب شد و با استفاده از داده‌های دبی مشاهده‌ای ایستگاه هیدرومتری حوزه آبخیز سنجابی (ایستگاه دوآب مرک) با اجرای برنامه SUFI2 حساسیت‌سنجی برای این پارامترها انجام شد که نتایج آن در شکل ۴ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۴، حساس‌ترین پارامترها در حوزه آبخیز مورد مطالعه عبارتند از SOL_BD (چگالی توده خاک)، CN2 (شماره منحنی SCS در شرایط رطوبتی متوسط) و ESCO (فاکتور جبران تبخیر از خاک). به این ترتیب ۱۰ پارامتر حساس‌تر انتخاب و واسنجی شد که نتایج در جدول ۲ ارائه شده است. پس از واسنجی مدل SWAT، نتایج دبی مشاهده‌ای و محاسباتی در حوزه آبخیز سنجابی برای گام زمانی ماهانه در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین، هیدروگراف جریان که به‌وسیله مدل SWAT در دوره آماری ۲۰۰۷-۲۰۰۵ اعتبارسنجی شد که در شکل ۶ نشان داده شده است. به‌منظور ارزیابی کارآیی این مدل مقادیر معیارهای NS (ناش-ساتکلیف)، R^2 (ضریب تبیین)، MARE (خطای نسبی میانگین قدر مطلق) و درصد تفاوت (D) به‌شرح جدول ۳ حاصل شد.

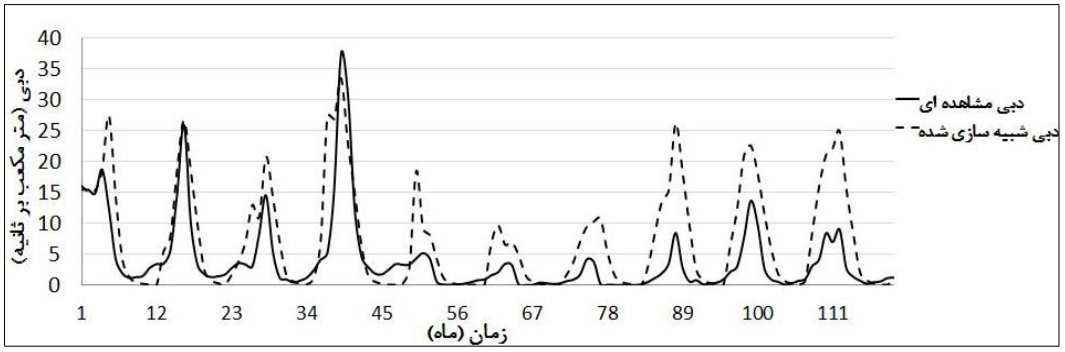
[1] Cumulative Distribution
[2] Latin Hyper Cube Sampling
[3] 95 Percent Prediction Uncertainty
[4] Jacobian
[5] Hessian Matrix



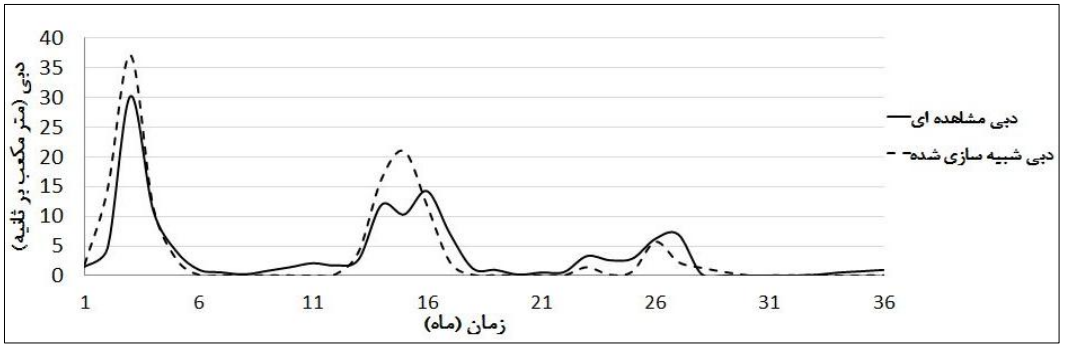
شکل ۳- مقادیر جریان ماهانه شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای رودخانه دوآب مرک در دوره ۲۰۰۴-۱۹۹۵ قبل از واسنجی



شکل ۴- نتایج حساسیت‌سنجی در برنامه SUFI2



شکل ۵- مقادیر جریان ماهانه شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای رودخانه دوآب مرک در دوره ۲۰۰۴-۱۹۹۵ پس از واسنجی



شکل ۶- مقادیر جریان ماهانه شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای رودخانه دوآب مرک در دوره اعتبارسنجی (۲۰۰۷-۲۰۰۵)

جدول ۲- حساسیت‌سنجی، واسنجی و بهینه‌سازی پارامترهای مدل SWAT برای دوره ماهانه در برنامه SUFI2

رتبه حساسیت	پارامتر	علامت اختصاری پارامتر	حداقل	حداکثر	مقدار بهینه پارامتر
۱	چگالی توده خاک	SOL_BD	-۰/۵۷	-۰/۲۶	-۰/۳۵**
۲	شماره منحنی SCS	CN2	۰/۰۴	۰/۱۵	۰/۱**
۳	فاکتور جبران تبخیر از خاک	ESCO	۰/۹۰	۱/۰	۱/۰*
۴	زمان تاخیر جریان زیر زمینی	Gw_Delay	-۱۷/۳۵	۵۴/۵	۵۰*
۵	ضریب انتقال از سفره کم‌عمق به عمیق	RCHRG_DP	۰/۰۸	۰/۱۲	۰/۱**
۶	هدایت هیدرولیکی مؤثر کانال	CH_K2	۳۵	۴۲	۴۰*
۷	درجه حرارت ذوب برف	SMTMP	-۵/۰	۵/۰	۱/۰*
۸	ضریب مانینگ در کانال اصلی	CH_N2	۰/۱۵	۰/۲۸	۰/۱۶*
۹	ظرفیت آب قابل دسترس در لایه خاک	SOL_AWC	۰/۱۴	۰/۲۱	۰/۱۵**
۱۰	حداکثر ذخیره تاج پوشش گیاهی	CANMX	۱/۰	۲۴	۶/۰*

*جایگزین مقادیر پارامتر، ** ضرب در مقادیر پارامتر (درصد)

جدول ۳- شاخص‌های ارزیابی در دوره واسنجی و اعتبارسنجی

شاخص ارزیابی	NS	R^2	MARE	D
دوره واسنجی	۰/۷۸	۰/۷۸	۰/۲۰	-۰/۲۰
دوره	۰/۷۴	۰/۸۶	۰/۳۰	۰/۰۱

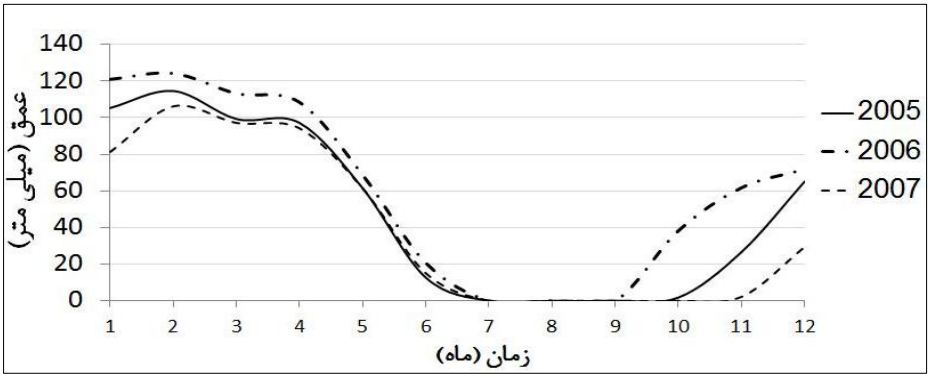
همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، ضریب ناش-ساتکلیف (NS) که مهم‌ترین معیار ارزیابی مدل SWAT می‌باشد، بزرگ‌تر از ۰/۷۵ در دوره واسنجی است و از آن‌جا که NS ضریبی است که اختلاف نسبی بین مقادیر مشاهده و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد و مقادیر نزدیک به یک آن بهینه است، این مقدار حاکی از شبیه‌سازی خوب مدل در گام زمانی ماهانه می‌باشد. عموماً اگر شاخص ناش-ساتکلیف بیشتر از ۰/۷۵ باشد، مدل عالی و کامل اجرا شده است و اگر بین ۰/۷۵ تا ۰/۳۶ باشد، رضایت‌بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد، غیرقابل قبول فرض می‌شود. همچنین، مقدار ضریب تبیین R^2 در دوره اعتبارسنجی افزایش یافته است و با توجه به اینکه R^2 نسبت پراکندگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد و مقادیر نزدیک به یک این معیار، حاکی از نتایج بسیار خوب در شبیه‌سازی می‌باشد، در این پژوهش مقادیر R^2 در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی بسیار مطلوب می‌باشد.

با توجه به این‌که مقادیر نزدیک به صفر معیار خطای نسبی میانگین قدرمطلق (MARE)، بهینه می‌باشد، بنابراین اعداد حاصل شده برای این معیار در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی قابل قبول و رضایت‌بخش هستند. معیار ضریب درصد تفاوت (D)، تفاوت بین مقادیر مشاهده‌ای و مقادیر شبیه‌سازی شده را در یک دوره زمانی خاص نشان می‌دهد و مقادیر مثبت برای این ضریب نشان‌دهنده بیش برآوردی مدل و مقادیر منفی حاکی از کم برآوردی مدل است. نتایج این معیار در این پژوهش، بیانگر مقدار ناچیزی کم برآوردی مدل SWAT در دوره واسنجی و بیش برآوردی ناچیز این مدل در دوره اعتبارسنجی می‌باشد. از آن‌جا که هرچه این معیار به صفر نزدیک‌تر باشد، برآورد مدل بهتر انجام شده است، نتایج این پژوهش دقت مدل SWAT را در شبیه‌سازی رواناب ماهانه نشان می‌دهد.

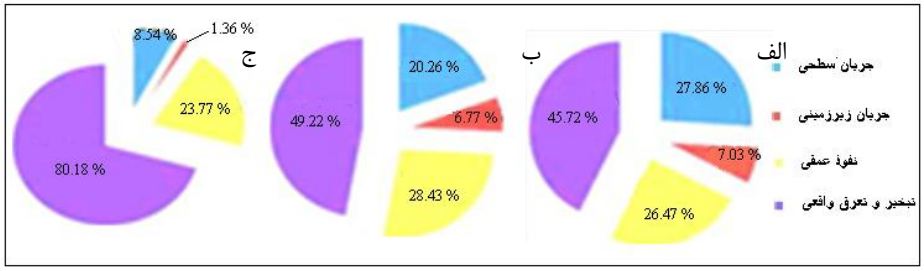
با توجه به نتایج اجرای مدل SWAT2009 بیلان آبی برای یک سال تر (۲۰۰۶)، یک سال خشک (۲۰۰۷) و یک سال معمولی (۲۰۰۵) بررسی شد. سال‌های یادشده با توجه به مقایسه بارش سالانه و میانگین متحرک سه‌ساله بارش سالانه حوضه مورد پژوهش تعیین شد. مدل SWAT با استفاده از رابطه (۵) مقدار آب موجود در خاک را محاسبه می‌کند. شکل ۷ تغییرات مقدار آب موجود در خاک را برحسب میلی‌متر در سه سال مورد بررسی (۲۰۰۷-

۲۰۰۵) به تفکیک سال آبی نشان می‌دهد. به‌طورکلی، در ماه‌هایی از سال که این نمودار روند افزایشی داشته باشد، بیلان آبی مثبت و در ماه‌هایی که این نمودار روند کاهشی داشته باشد، بیلان آبی منفی خواهد بود. سهم هر یک از اجزای بیلان آبی شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل در سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ در شکل ۸ نشان داده شده است.

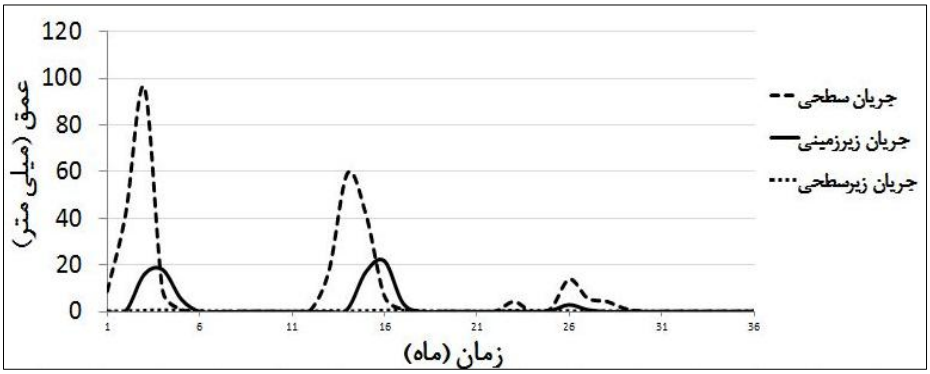
همچنین، مدل SWAT رواناب را به‌صورت سه نوع جریان زیرسطحی، زیرزمینی و جریان جانبی از هم تفکیک و محاسبه می‌کند که در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، جریان‌های سطحی، سهم قابل توجهی در جریان رواناب دارند و توجه بیشتر به این بخش از رواناب در حوضه سنجابی اهمیت دارد.



شکل ۷- مقایسه تغییرات ماهانه مقدار آب موجود در خاک در حوضه سنجابی در سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷



شکل ۸- سهم هر یک از اجزای بیلان آب از بارش سالانه در حوضه سنجابی سال ۲۰۰۵ (الف)، سال ۲۰۰۶ (ب) و سال ۲۰۰۷ (ج)



شکل ۹- اجزای جریان در حوزه آبخیز سنجابی در سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷

با بررسی اجزای بیلان آبی شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل SWAT، نتیجه شد که بیلان آبی سالانه در هر سه سال ۲۰۰۷-۲۰۰۵ منفی است، زیرا مجموع مقادیر تلفات ناشی از تبخیر و تعرق واقعی، رواناب کل و نفوذ عمقی بیشتر از مقدار بارش در این سال‌ها می‌باشد. با این حال، بیلان آبی ماهانه در فصل‌های پاییز و زمستان در این سه سال مثبت و در فصل‌های بهار و تابستان منفی بوده است.

با توجه به این‌که منطقه مطالعاتی در غرب ایران واقع شده است و جز مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد، لذا دست‌یابی به بیلان منفی آب در این سال‌ها در سطح این حوزه آبخیز دور از انتظار نخواهد بود. بیلان آبی منفی نشان‌دهنده هدر رفت ذخایر آب موجود در خاک و منابع زیرزمینی حوضه از طریق پدیده تبخیر و تعرق و نفوذ عمقی می‌باشد. لازم به‌توضیح است که این آب تلف شده (مازاد بر بارندگی) از ذخایر سال‌های قبل است که در قالب رطوبت خاک و آب‌های زیر سطحی برای سال‌های مورد پژوهش باقی مانده است.

با توجه به نتایج این پژوهش مشخص شد که بیشتر هدر رفت آب در حوضه مورد مطالعه به‌وسیله تبخیر و تعرق صورت می‌گیرد. همچنان که نتایج Salmani (۲۰۱۱) نشان داد، تبخیر و رواناب دو عامل اصلی در هدر رفت آب از حوزه آبخیز قزاقلی (از زیرحوضه‌های آبخیز گرگانرود) می‌باشند. همچنین، Hosseini (۲۰۱۰) نیز در مطالعه تأثیرات تغییر کاربری اراضی روی بیلان آبی و رسوبات معلق در حوزه آبخیز طالقان ایران، تلفات تبخیر و تعرق را عامل اصلی هدر رفت آب در این حوضه دانست.

در پژوهش حاضر، بخش هیدرولوژیکی مدل SWAT در حوزه آبخیز سنجابی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد مدل SWAT در برآورد بیلان آبی در حوزه آبخیز سنجابی از کارآیی مناسبی برخوردار است و می‌تواند در حوزه‌های آبخیز مشابه مورد استفاده واقع شود. با توجه به این‌که این بخش پیش‌نیاز شبیه‌سازی فرسایش و رسوب می‌باشد، پیشنهاد می‌شود بخش فرسایش و رسوب این مدل نیز به‌منظور عملیات حفاظتی در این حوضه مورد استفاده و ارزیابی قرار گیرد و زیرحوضه‌های مختلف از نظر فرسایش‌پذیری رتبه‌بندی شود.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از آقای مهندس سید محمودرضا طباطبائی از همکاران هیئت علمی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری برای راهنمایی‌های ارزشمندشان سپاسگزاری می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Ababaei, B. 2008. Assessing the performance of SWAT model in Zayandeh Rud Watershed. MSc Thesis, Tehran University, 115 pages (in Persion).
2. Abbaspour, K.C., C.A. Johnson and M.Th. Van Genuchten. 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. Vadose Zone, 3: 1340-1352.
3. Abbaspour, K.C., J. Yang, I. Maximov and R. Siber. 2007. Modelling of hydrology and water quality in the Pre-Alpine/Alpine Thur Watershed using SWAT. Journal of Hydrology, 333: 413-430.
4. Abbaspour, K.C., C.A. Johnson, M.Th. Van Genuchten, R. Schulin and E. Scholappi. 1997. A sequential uncertainty domine inverse procedure for estimating subsurface flow and transport parameters. Water Resources Research, 33(8): 1879-1892.
5. Bingner, R.L., J. Garbrecht, J.G. Arnold and R. Srinivasan. 1997. Effect of watershed subdivision on simulation runoff and fine sediment yield. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 40(5): 1329-1335.
6. Faramarzi, M., K.C. Abbaspour, R. Schulin and H. Yang. 2009. Modelling blue and green water resources availability in Iran. Hydrological Processes, 23(3): 486–501.
7. Hosseini, M. 2010. Effect of landuse changes on water balance and suspended sediment yield of Taleghan Catchment, Iran. PhD Thesis, University Putra Malaysia, 226 pages.
8. Manguerra, H.B. and B.A. Engel. 1998. Hydrologic parameterization of watersheds for runoff prediction using SWAT. Journal of the American Water Resources Association, 34(5): 1149-1162.
9. Misra, R.K. and C.W. Rose. 1995. An examination of relationship between erodibility parameters and soil strength. Jornal of Soil Reserch, 33: 715-732.
10. Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams and W.K. King. 2002. Soil and water assessment tool theoretical documentation. Blackland Research Center, Texas, Agricultural Experiment Station.
11. Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams and W.K. King. 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Blackland Research Center, Texas, AgriLife Research.
12. Rezaei, A. 2000. Concepts of probability and statistics. Mashhad pub.'s, First edition, Mashhad, 188 pages (in Persion).

13. Saeidi, R. 2011. Hydrological simulation of watersheds located in arid regions using SWAT. MSc Thesis, Tehran University, 120 pages (in Persion).
14. Salmani, H. 2011. Optimize the effective parameters for rainfall-runoff in SWAT semi distributive model (Case study: Ghazaghly Basin, Golestan Province), MSc Thesis, Tehran University, 140 pages (in Persion).
15. Tripathi, M.P., R.K. Panda, N.S. Raghuwanshi and R. Singh. 2004. Hydrological modeling of a small watershed using generated rainfall in the soil and water assessment tool model. Hydrological Processes, 18: 1811–1821.

Evaluating SWAT2009 model for water balance simulation

Azade Jabary[*1], Majid Hosseini[2] and Amir Khosrojerdi[3]
[1] PhD Student, Lorestan University, Iran [2] Assistant professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Iran, [3] Assistant Professor, Sciences and researches Unit, Islamic Azad University, Iran

Received: 09 April 2013 Accepted: 16 September 2013

Abstract

The present research is looking for determining and evaluation of water balance in Sanjabi Watershed located in Kermanshah Province due to a variety of problems raised by the population increase. For this purpose, the SWAT model parameters have been calibrated by applying required information layers in a period extending from 1995 to 2004 and their sensitivity were analyzed by SUFI2 program. The flow parameters' sensitivity was computed by P-Value and t-State in SUFI2. The most sensitive parameters were calibrated and thereafter model was validated for a period extending from 2005 to 2007. The model evaluation results showed that the value of NS (Nash Sutcliff), R^2 (Coefficient of determination), Mean Absolute Relative Error (MARE) and Percent Difference (D) for calibration period were 0.78, 0.78, 0.2 and -0.2, respectively and for validation period were 0.74, 0.86, 0.3 and 0.01, respectively. Results showed the desired accuracy of SWAT for runoff simulation. Discharges for calibration and validation periods were generally under and overestimated, respectively. The water balance values are calculated as the amount of water available in the soil. So that the water balance resulted as negative in years 2005 (normal year), 2006 (wet year) and 2007 (dry year). Nevertheless, in these three years, autumn and winter monthly water balances were positive while in spring and summer were negative. The results also showed that most water losses were due to evapotranspiration in this watershed.

Key words: Calibration, Sanjabi watershed, Sensitive parameter, Sensitivity analysis, Validation

[*] Corresponding Author: jabary.az@gmail.com