DOI: 10.29252/ARIDBIOM.2022.16619.1852

بررسی بیلان آب حوزه آبخیز فخرآباد مهریز با استفاده از مدل SWAT (مقالۀ پژوهشی)

۱- سارا پرویزی*، دانشجوی دکتری آبخیزداری حفاظت آب و خاک، دانشگاه یزد، یزد، ایران
saraparvizi90@yahoo.com
۲- علی طالبی، استاد گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی دانشگاه یزد، یزد، ایران
۳- علیرضا ماندگار، کارشناس‌ارشد عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۲
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۵

چکیده
مدیریت منابع آب به‌ویژه در حوزه‌های آبخیز بدون آمار، مستلزم شناخت فرآیندهای هیدرولوژیکی به‌خصوص رواناب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین فازهای چرخه هیدرولوژیکی است. تحقیق حاضر با هدف تعیین کارآیی و قابلیت استفاده از مدل SWAT در شبیه‌سازی بیلان آبی حوزه آبخیز فخرآباد مهریز انجام شد. به‌منظور اجرای اوّلیّۀ مدل، داده‌های مورد نیاز شامل داده‌های هواشناسی (بارش، حداقل و حداکثر دما، رطوبت نسبی، سرعت باد)، نقشه‌های پایۀ منطقه (نقشۀ رقومی ارتفاع، کاربری اراضی، شیب و نقشه خاک) و داده‌های دبی ماهانۀ ایستگاه هیدرومتری فخرآباد استفاده شد. پس از اجرای اوّلیّه مدل SWAT، خروجی برای واسنجی و اعتبارسنجی به نرم‌افزار SWAT-CUP فراخوانی شد و پس از آنالیز حساسیت به‌منظور مشخص‌کردن متغیرهای حساس مدل اجرا گردید. واسنجی و اعتبارسنجی برای بازه زمانی ۱۹۹۸-۲۰۱۴ انجام شد. دقت شبیه‌سازی رواناب ماهانه با استفاده از شاخص ضریب تعیین (R^2) و نش‌ساتکلیف (NSE) برای مرحلۀ واسنجی ۰/۷۳ و ۰/۷۱ و برای مرحلۀ اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۵۴ و ۰/۵۳ به دست آمد. برای شاخص‌های ارزیابی عدم قطعیت نیز مقادیر قابل قبولی به دست آمد. P-فاکتورو R-فاکتور، برای دورۀ واسنجی به ترتیب ۰/۵۶ و ۰/۶۵ و برای دورۀ اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۵۴ و ۰/۶۸ محاسبه شد. نتایج نهایی نشان داد که به‌طور متوسط حدود ۶۷ درصد بارش به‌صورت تبخیر و تعرّق وارد اتمسفر می‌گردد، ۲۳ درصد به‌صورت رواناب سطحی و جریان زیرسطحی به آبراهه‌ها وارد می‌شود. نتایج نشان‌دهندۀ کارآیی مدل SWAT در شبیه‌سازی بیلان آبی حوزه آبخیز فخرآباد است و به برنامه‌ریزی دقیق‌تر منابع آب در این حوضه کمک می‌کند.

واژگان کلیدی: الگوریتم SUFI2، تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، مدل هیدرولوژیکی

مقدّمه
شناخت و درک مفهوم بیلان آب در راستای مدیریت پایدار منابع آب در سطح حوضه‌های آبریز است. این مفهوم به بررسی تبادلات آب در یک محدوده بر اساس اصل بقای ماده در چرخۀ آب تأکید دارد. بر اساس این تعریف، کلیه آب‌هایی که در یک زمان معین وارد یک محدودۀ خاص می‌گردد، به مصرف رسیده، ذخیره شده و یا به‌صورت‌های مختلف از محدودۀ مشخص شده خارج می‌گردد، جمع بیلان را تشکیل می‌دهند.

مهم‌ترین عناصر بیلان آب از دیدگاه مدیریت منابع آب شامل بارش، تبخیر و تعرّق، رواناب سطحی، جریان آب زیرزمینی و جریان جانبی است. امروزه با توجّه به اهمّیّت شناخت و آگاهی از وضعیّت بیلان آبی و تحلیل رفتار هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز به‌ویژه حوزه‌های آبخیز بدون آمار، برای برنامه‌ریزی و اجرای طرح‌های آبی، استفاده از فنّاوری‌های نوین در پیش‌بینی مؤلفه‌های بیلان آبی ضروری است [۱].

امروزه برای مطالعه و برنامه‌ریزی پایدار و مؤثّر در مدیریت جامع حوضه‌های آبریز، از مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. نمونه‌ای از مدل‌های هیدرولوژیک با مبنای فیزیکی SWAT است که براساس ویژگی‌های

حوضهٔ آبریز و شرایط اقلیمی آن به شبیه‌سازی در مقیاس بزرگ و همچنین پایش فرآیندهای مرتبط با چرخه آب می‌پردازد [۸].

در پژوهشی با استفاده از مدل SWAT، اجزای بیلان آب در ایران شبیه‌سازی و ارتباط آنها را با تولید گندم، با در نظر گرفتن عملکرد سدها و اقدامات آبیاری اراضی کشاورزی بررسی شد. بیلان آب کشور شامل جریان آبِ آبی (مقدار آبی که به آب زیرزمینی اضافه می‌شود)، جریان آب سبز (تبخیر و تعرّق واقعی و پتانسیل)، و ذخیرهٔ آب سبز (رطوبت خاک) را در سطح زیرحوضه و در مقیاس زمانی ماهانه کمّی کردند [۲].

در پژوهشی دیگر از مدل SWAT برای شبیه‌سازی فرسایش و انتقال رسوب در حوزه قره‌سو استان گلستان و شناسایی و اولویت‌بندی مناطق بحرانی حوضه از نظر فرسایش و رسوب استفاده شد. پس از واسنجی، اعتبارسنجی و تحلیل عدم قطعیّت مدل با روش نیمه‌خودکار SUFI2 از خروجی‌های مدل واسنجی شده، برای بررسی تغییرات مکانی فرسایش و رسوب در سطح حوزه استفاده نمودند. برای این کار، چهار شاخص شامل رسوب‌دهی در واحد سطح، غلظت رسوب، بار رسوب و شاخص کلّی بر اساس خروجی‌های مدل تعریف و تحلیل شد. نتایج نشان داد که با وجود کمبود و عدم قطعیّت داده‌های موجود، کارآیی مدل SWAT برای شبیه‌سازی فرسایش و رسوب در حوزه قره‌سو نسبتاً قابل قبول است [۱۹].

در مطالعه‌ای بررسی کارآیی مدل SWAT در تعیین مؤلفه بیلان آبی حوزه آبخیز سمیرم پرداخته شد. ضریب تعیین و نش‌ساتکلیف برای فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷۳، ۰/۶۹، ۰/۷۱ و ۰/۵۸ مشاهده شد که نتایج نشان‌دهندهٔ کارآیی مدل در تعیین مؤلفه بیلان آبی حوضه بود [۹]. در پژوهشی بیلان آبی حوزه آبخیز قره‌سو، واقع در استان کرمانشاه با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی شد. دقت شبیه‌سازی ماهانه با استفاده از شاخص نش‌ساتکلیف در دورهٔ واسنجی ۵۶ درصد و با شاخص R معادل ۶۹ درصد و در دورهٔ اعتبارسنجی به ترتیب برابر ۶۹ درصد و ۶۵ درصد به دست آمد. نتایج حاکی از کارآیی مناسب مدل SWAT درشبیه‌سازی بیلان آبی و بررسی اثرات اقدامات مختلف مدیریتی و یا تغییرات اقلیمی بر دبی جریان آبخیز قره‌سو می‌باشد [۴].

بررسی آب موجود در خاک توسط مدل SWAT نشان داد که این مدل با توجّه به مقدار محک‌های آماری R^2 و نش‌ساتکلیف که به ترتیب اعداد ۷۷ درصد و ۷۵ درصد گزارش شده بود، یک ابزار مناسب برای تخمین مقدار آب موجود در خاک در مناطق با اطلاعات ضعیف است [۳].

در پژوهشی از مدل SWAT برای بررسی بیلان آب حوزه آبخیز Adaja-Eresma-Cega استفاده شد. ضریب نش‌ساتکلیف برای دورهٔ واسنجی ۱۶ درصد و برای دورهٔ اعتبارسنجی ۶۷ درصد به‌دست آمد. نتایج به‌دست آمده حاکی از عملکرد بالای مدل در شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیکی حوضه‌های بزرگ مقیاس بخصوص مناطقی با شرایط نیمه‌خشک سرد می‌باشد [۱۴]. در مطالعه‌ای بررسی تغییر اقلیم بر پارامترهای هیدرولوژیکی حوزهٔ آبخیز جامیشان با مدل SWAT و مدل چرخش عمومی جو HadCM3 انجام گرفت. نتایج نشان داد رواناب در دورهٔ آماری ۲۰۱۵ و دورهٔ آماری ۲۰۲۶ افزایش می‌یابد [۱۱].

در سال‌های اخیر به طور گسترده از مدل SWAT استفاده می‌شود که این مسأله نشان از اهمّیّت و کاربرد این مدل دارد. از طرفی یکی از مسائل حل نشده در مناطق خشک، مسأله مقادیر کمی بیلان آب است که در این مقاله صرفاً بر تعیین مقادیر مؤلفه‌های اصلی بیلان آب حوزه متمرکز شده است.

با توجّه به وضعیّت منابع آب کشور و شرایط اقلیمی و کمبود داده‌های اندازه‌گیری شده و صرفه‌جویی در وقت و هزینه و نتایج قابل قبول مدل SWAT در شبیه‌سازی بیلان آب، در حوزه آبخیز فخرآباد به بررسی کارآیی این مدل در شبیه‌سازی مولفه‌های بیلان آب پرداخته شد تا بتوان بهتر این حوضه را مورد ارزیابی قرار داد و برنامه‌های مدیریتی مناسب را برای استفاده بهینه از منابع آب مطرح نمود.

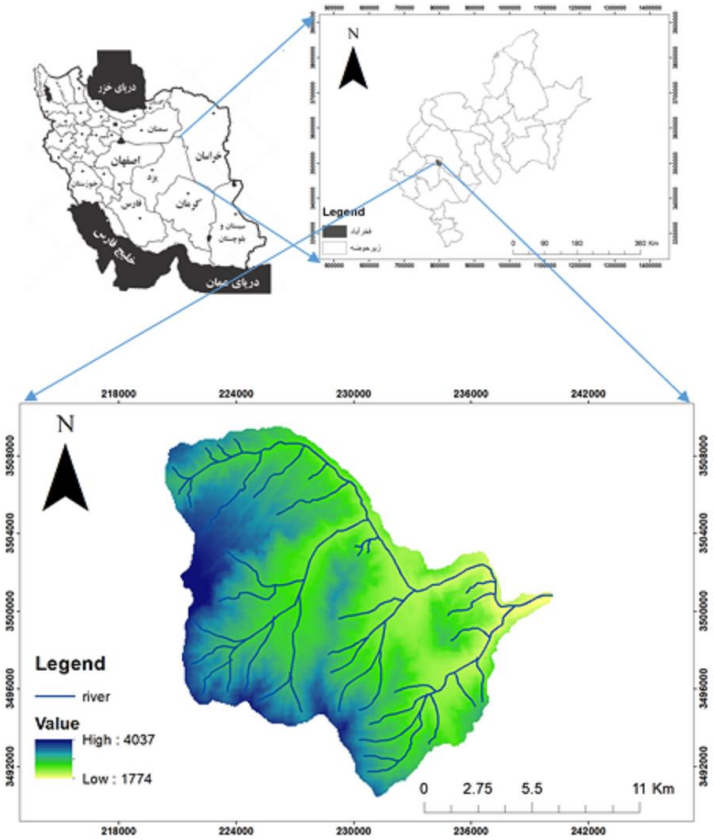
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز فخرآباد یزد یکی از زیرحوزه‌های دشت یزد-اردکان در دامنهٔ شرقی رشته‌کوه شیرکوه بین طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۱۵ دقیقه شرقی و عرض ۳۱ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۴۱ دقیقه شمالی قرار دارد. این حوزه در کمربند کوهستانی خشک با تابستان‌های نسبتاً ملایم و زمستان‌های کوتاه و سرد قرار گرفته است.

خروجی این حوزه در دشت ابراهیم آباد بوده که آب ناشی از باران و ذوب برف حوزه توسط رودهای فصلی به این دشت وارد می‌شود. متوسط ارتفاع حوزه ۲۷۲۰ متر، مساحت حوزه ۲۰۷ کیلومتر مربع و متوسط بارش سالانه حوزه ۲۰۵ میلی‌متر است. از آنجا که اختلاف ارتفاع بالادست حوزه با ارتفاع ۴۰۷۵ متر از سطح دریا برای قلّهٔ شیرکوه نسبت به خروجی حوزه (۱۸۰۰متر) نسبت به وسعت حوزه زیاد می‌باشد، بنابراین رژیم و توزیع بارش‌ها در بخش‌های مختلف حوزه متفاوت می‌باشد. بارش‌ها در دهبالا بیشتر از نوع برف و متوسط بارش ۲۰ ساله این زیرحوزه حدود ۳۰۰ میلی‌متر و این در حالی است که در منطقه فخرآباد بارش بیشتر از نوع باران و متوسط بارش سالانه آن حدود ۱۰۰ میلی‌متر است. به طور کلّی، ۲۴ درصد از کل ریزش‌های جوّی سالانهٔ این حوزه به صورت برف است [۱۰].

رژیم حرارتی منطقه، رژیم مدیترانه‌ای با زمستان‌های سرد و منطبق با فصل سرد و تابستان‌های گرم و خشک است به‌طوری که گرم‌ترین ماه سال تیر و سردترین دی می‌باشد [۵]. متوسط دمای حداقل سالانه ۸°C و متوسط دمای حداکثر سالانه ۱۸°C است. سازندهای زمین‌شناسی در حوزهٔ مورد مطالعه اغلب شامل آهک کرتاسه و گرانیت ژوراسیک و سازند آبرفتی کواترنری می‌باشد. همچنین شیل و ماسه‌سنگ نیز در بین دو سازند غالب در منطقه یافت می‌شود. شکل ۱ موقعیّت جغرافیایی حوزهٔ آبخیز فخرآباد را نشان می‌دهد.



شکل۱- موقعیّت جغرافیایی حوزه آبخیز فخرآباد در استان یزد و ایران

مدل SWAT

SWAT که مخفف عبارت Soil and Water Assessment Tool است، مدلی در مقیاس آبخیز بزرگ و یا زیرحوزه می‌باشد. مدل SWAT نمونه‌ای از مدل‌های با مبنای فیزیکی است، زیرا بر اساس راه حل معادلات اساسی فیزیک به شبیه‌سازی در مقیاس بزرگ و مطالعهٔ فرآیندهای سیستم اصلی می‌پردازد.

کوچک‌ترین واحد کاری در این مدل واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی یا HRU می‌باشد که از ترکیب نقشه‌های طبقات شیب، کاربری اراضی و خاک حاصل می‌شود. بر این اساس، باید SWAT را یک مدل نیمه‌توزیعی به شمار آورد. از نظر زمانی نیز فرآیندهای مختلف بیان شده را می‌توان در مقیاس زمانی روزانه، ماهانه و یا سالانه شبیه‌سازی کرد. روندیابی جریان توسط روش‌های ذخیره متغیر و ماسکینگام قابل محاسبه است. رواناب سطحی از بارندگی روزانه توسط روش شماره منحنی اصلاح شده محاسبه می‌شود.

شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژیک آبخیز در مدل SWAT

شبیه‌سازی بخش زمینی چرخه هیدرولوژیک در مدل SWAT، بر پایه بیلان آبی، رابطه ۱ صورت می‌گیرد [۸].

$$SWt = SW_o + \sum_{i=1}^{t}(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (۱)$$

که در آن: SWt: مقدار نهایی آب در خاک (میلی‌متر)، SW: مقدار اولیه آب در خاک (میلی‌متر)، R_{day}: مقدار بارندگی در روز i ام (میلی‌متر)، Q_{surf}: مقدار رواناب سطحی در روز i ام (میلی‌متر)، E_a: مقدار تبخیر و تعرّق در روز i ام (میلی‌متر)، W_{seep}: مقدار آبی که در روز i ام از پروفیل خاک به ناحیهٔ غیراشباع وارد می‌شود و Q_{gw}: مقدار جریان برگشتی (میلی‌متر) در روز i ام است [۸].

شبیه‌سازی حوزهٔ فخرآباد با استفاده از مدل SWAT

به‌منظور مدل‌سازی شرایط هیدرولوژیکی حوزه با مدل SWAT، ابتدا مدل رقومی ارتفاع با تفکیک‌پذیری ۳۰ متر حوزه فخرآباد، به محیط نرم‌افزار مدل (ArcSWAT) فراخوانده شد. پس از آن، با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی، خاک و طبقات شیب، واحدهای واکنش هیدرولوژیکی (HRU) تعریف شد. شکل ۲، نقشه‌های مورد نیاز برای اجرای مدل که شامل نقشه‌های خاک، نقشه شیب، نقشه کاربری اراضی و نقشه رقومی ارتفاعی است. در این مرحله، حوزهٔ فخرآباد به ۳۱ زیرحوزه و ۶۰ واحد واکنش هیدرولوژیک تقسیم شد.

برای اجرای مدل، از داده‌های روزانه اقلیمی دو ایستگاه هواشناسی داخل حوزه شامل ایستگاه‌های تبخیرسنجی ده بالا و ایستگاه باران‌سنجی طزرجان استفاده گردید. جدول ۱ موقعیّت ایستگاه‌های کلیماتولوژی در منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد. داده‌های ایستگاه کلیماتولوژی شامل بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل و رطوبت نسبی بود به صورت روزانه به مدل اضافه گردید.

جدول۱- مشخصات ایستگاه‌های کلیماتولوژیکی

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (m)
ده بالا	۵۴-۰۶-۴۰	۳۱-۳۵-۳۸	۲۶۰۶
طزرجان	۵۴-۱۱-۲۵	۳۱-۴۵-۲۵	۲۲۵۱

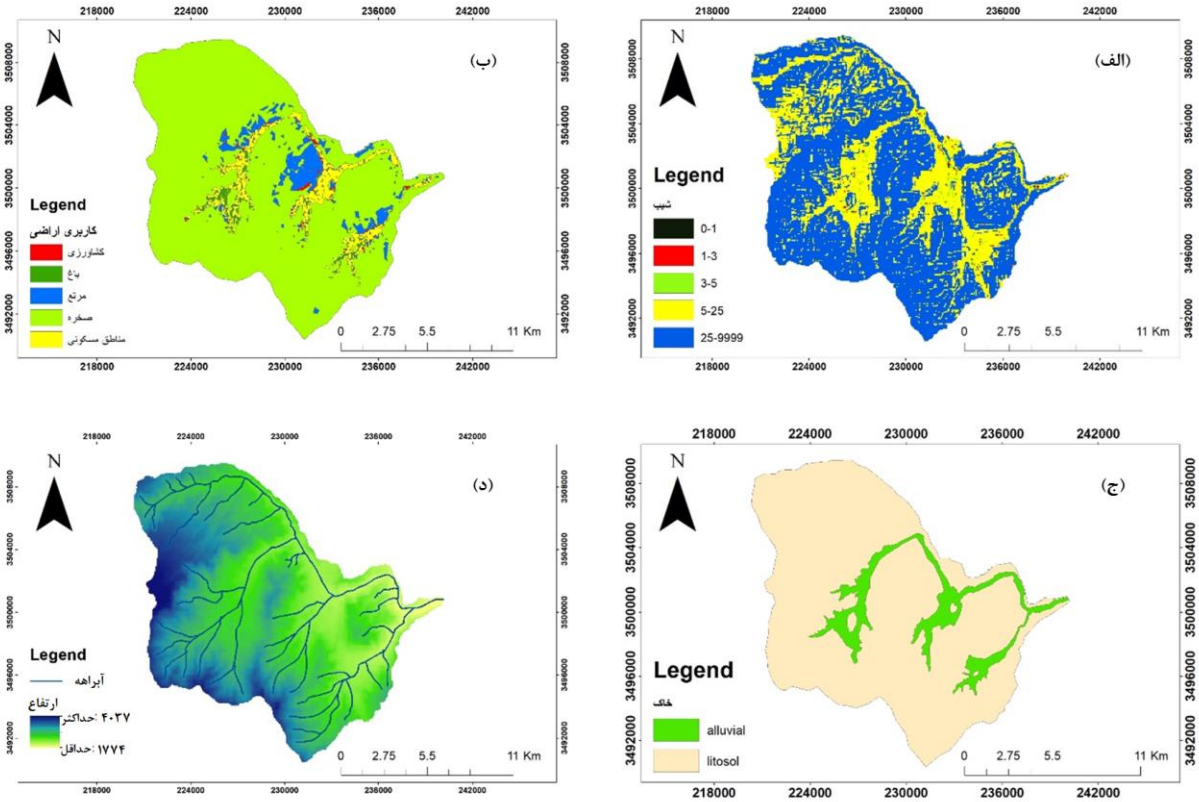
واسنجی مدل

در این تحقیق واسنجی مدل با استفاده از برنامه SUFI2 و بر اساس آمار سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۶ انجام شد. با استفاده از آنالیز حساسیت مدل، پارامترهای مؤثّر در این بخش شناسایی شده و در بهینه‌کردن مدل مورد استفاده قرار گرفت. با اجرای الگوریتم SUFI2 مقادیر بهینه پارامترهای حساس مدل تعیین شد.

الگوریتم SUFI2 یک روش بهینه‌سازی معکوس است که در آن، تمام منابع عدم قطعیّت در دامنهٔ معرفی شده برای هر پارامتر لحاظ می‌گردد. به این صورت که محدودهٔ اوّلیّهٔ پارامترها بعد از هر بار تکرار به‌وسیلهٔ محدودهٔ جدید پارامترها به دست آمده توسط مدل جایگزین شده و یک دامنه عدم‌قطعیّت محدودتری از پارامترها به‌دست می‌آید. این روند تا زمانی که دو شاخص کمّی‌سازی عدم‌قطعیّت به حد مطلوب خود برسند یعنی P-factor به یک و R-factor به صفر میل کند، ادامه پیدا می‌کند [۱۳]؛ ولی بیشتر به دلیل خطاهای گوناگون در داده‌ها و عدم‌قطعیّت

مدل‌های مفهومی، هیچگاه این مقادیر برای دو پارامتر ذکر شده به‌دست نمی‌آید. بدین منظور مدل مجدد اجرا شد تا بازه مناسب برای هر پارامتر به دست آید.

جهت واسنجی مدل، این الگوریتم چندین بار انجام می‌شود و در هر بار اجرا در صورت قابل قبول بودن نتایج بهینه‌سازی، از مقادیر بهینه پارامترها در مرحله اعتبارسنجی استفاده می‌شود. در صورت غیر قابل قبول بودن نتایج بهینه‌سازی دوباره انجام می‌گیرد تا نتایج مطلوب حاصل گردد. در این تحقیق ۲۶۰۰ بار برنامه SUFI2 اجرا شد و مدل واسنجی گردید.



شکل ۲- الف) نقشه شیب، ب) نقشه کاربری اراضی، ج) نقشه خاک، د) نقشه رقومی ارتفاع

اعتبارسنجی مدل

اعتبارسنجی مدل عبارت است از فرآیندی پس از واسنجی مدل که در آن قابلیت یک مدل انتخاب شده برای یک منطقه، برای پیش‌بینی صحیح دوره‌ای غیر از دوره واسنجی بررسی می‌شود. زمانی می‌توان گفت یک مدل اعتبارسنجی شده است که صحت و قابلیت پیش‌بینی آن در دوره اعتبارسنجی با مقدار خطای قابل قبول اثبات شده باشد.

لازم به ذکر است که عبارت اعتبارسنجی یک مدل به یک منطقهٔ خاص اشاره دارد و نباید این تصوّر غلط به وجود آید که مدل برای تمامی نقاط اعتبارسنجی شده است. انجام این مرحله با استفاده از مقادیر پارامترهای اصلاح شده در مرحلهٔ واسنجی و براساس آمار سال‌های ۲۰۰۷ الی ۲۰۰۱۴ صورت گرفت.

نتایج و بحث

آنالیز حساسیت

با توجه به زیادبودن پارامترهای ورودی، برای شناخت بهتر مدل و انجام موفق واسنجی، لازم است برای پارامترهای مدل آنالیز حساسیت انجام شود. هدف اصلی از آنالیز حساسیت تعیین ورودی‌هایی است که مشارکت بیشتری در تغییر خروجی دارند و اینکه کدام پارامتر همبستگی بیشتری با خروجی دارد [۱۷].

با انجام آنالیز حساسیت می‌توان مولفه‌های مهم و حساس را شناخته و با تمرکز بر روی آنها واسنجی مدل را سریع‌تر انجام داد.

برای انجام آنالیز حساسیت، روش یک پارامتر در هر بار یا OAT مورد استفاده قرار گرفت که متعارف‌ترین روش برای این کار می‌باشد. در این روش، در هر بار اجرای مدل یک پارامتر تغییر می‌کند و بقیه ثابت می‌مانند و اثر آن تغییر بر تابع هدف، حساسیت پارامتر را مشخص می‌کند [۱۵]. متغیرهای حساس مدل در منطقه مطالعاتی در جدول ۲ آورده شده است این متغیرها بر اساس ترتیب اهمیت و تأثیر در مرحله واسنجی مدل در برنامه SUFI2 ذکر گردیده است و در این بین شماره منحنی به عنوان حساس‌ترین متغیرشناخته شد.

جدول۲- مقادیر بهینه مولفه‌های حساس حوزه فخرآباد بعد از واسنجی

ردیف	پارامتر	توضیح	مقداربهینه پارامتر	ردیف	پارامتر	توضیح	مقداربهینه پارامتر
۱	R__CN2	شماره منحنی در شرایط رطوبتی ۲	-۰/۱۹	۹	V__ALPHA_BNK	ضریب α آب پایه برای ذخیره ساحلی کانال	۰/۳۱
۲	V-CH-N2	ضریب مانینگ رودخانه اصلی	۰/۲۷	۱۰	R_SOL_AWC	ظرفیت آب قابل دسترس خاک	۰/۸۸
۳	V__CH_K2	هدایت هیدرو لیکی موثر بستر رودخانه اصلی	۷۶/۴۳	۱۱	V-SLSUBBSN	متوسط طول شیب در هر HRU (متر)	۱۲/۵۱
۴	V__SFTMP	متوسط دمای هوا برای تبدیل بارش به برف (درجه سانتی گراد)	۶/۴۴	۱۲	R__SOL_ALB	دمای ذوب توده برف (درجه سلسیوس)	۰/۰۷
۵	V-EPCO	فاکتور جبران نگهداشت گیاهی	۰/۴۷	۱۳	V__ALPHA_BF	ضریب α آب پایه	۰/۰۵
۶	R__OV_N	ضریب مانینگ جریان سطحی	۰/۵۴	۱۴	V__GW_DELAY	زمان تأخیر انتقال آب از آخرین پروفیل خاک به سطح آب زیر زمینی	۱۴/۹۲
۷	R__SOL_BD	چگالی خاک در حالت مرطوب	۲/۵	۱۵	V__GWQMN	حداقل مقدار ذخیره آب لازم در سفره برای رویداد جریان پایه	۵۰۰
۸	V-ESCO	ضریب تبخیر خاک	۰/۱	۱۶	V__SMTMP	دمای ذوب توده برف (درجه سانتی گراد)	-۱/۶

در جدول ۲، r نشان‌دهندهٔ روش Multiple و v نشان‌دهندهٔ روش Replace در واسنجی است. این روش‌ها برای سهولت تغییر مقدار پارامترها در واسنجی ابداع شده‌اند. در روش Replace، مقدار اولیه پارامتر مورد نظر با ارزش داده شده جایگزین می‌شود، اما در روش Multiple، مقدار اولیه در (۱+ ارزش داده شده) ضرب می‌گردد.

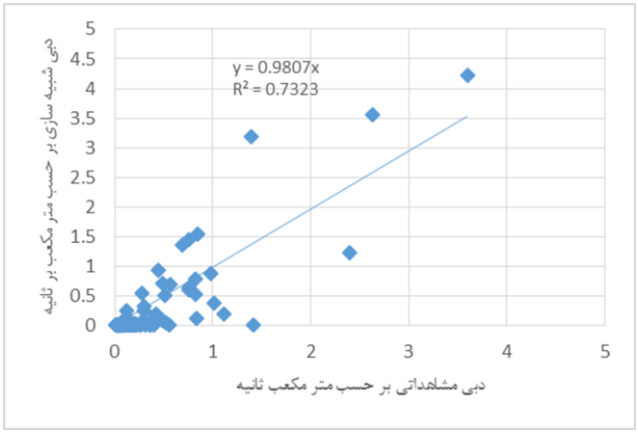
نتایج واسنجی مدل SWAT

واسنجی مدل به صورت ماهانه و با استفاده از برنامهٔ SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CUP انجام گردید. پارامترهای مؤثر در تولید رواناب حوزه آبخیز شناسایی شد و به همراه محدودهٔ مجاز تغییرات آنها به مدل وارد گردید.

از آمار ۹ سالهٔ اندازه‌گیری شده (۱۹۹۸ تا ۲۰۰۶)، بارندگی، دما و دبی روزانه برای واسنجی مدل استفاده شد. در این مرحله بایستی به دفعات مختلف اقدام به اجرای مدل نموده و هر بار با توجه به شاخص‌ها و

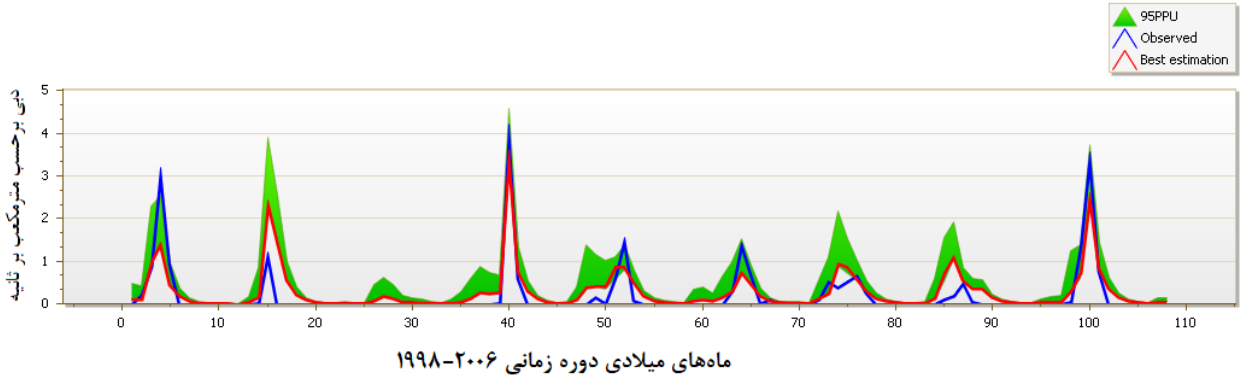
معیارهای آماری، نتایج را مورد ارزیابی قرار داد. در صورت رضایت‌بخش نبودن نتایج شبیه‌سازی، بایستی پارامترهای موجود در مدل بهینه شده و مجدداً مدل را اجرا نمود تا جریان شبیه‌سازی شده از لحاظ آماری دارای دقّت مناسب باشد.

در تحقیق حاضر نیز بعد از اجرای مدل در دفعات متعدّد، هر بار پارامترهای حساس تغییر داده شد و در آخر بعد از بهینه‌شدن پارامترها، ۲۶۰۰ بار برنامه SUFI2 اجرا و برای منطقهٔ مطالعاتی کالیبره شد. (جدول ۲). نتایج مدل در مرحله واسنجی NSE و R^2 به ترتیب ۰/۷۱ و ۰/۷۳است که نشان دهندهٔ مناسب‌بودن نتایج می‌باشد. شکل ۳ نمودار همبستگی مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی را در دوره واسنجی نشان می‌دهد. مقدار ضریب R^2 نشان‌دهندهٔ همبستگی خوب داده‌های دبی شبیه‌سازی و مشاهداتی است.



شکل۳- نمودار همبستگی مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی در دوره واسنجی

شکل ۴، مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی در دوره واسنجی برای پایهٔ زمانی ۱۹۹۸-۲۰۰۶ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص شد که در مورد ویژگی‌های مهم هیدروگراف از قبیل دبی پیک، حجم رواناب و زمان رسیدن به دبی اوج، بین دو هیدروگراف تطابق مناسبی وجود دارد.



شکل۴- مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در دوره واسنجی با پایه زمانی ماهانه

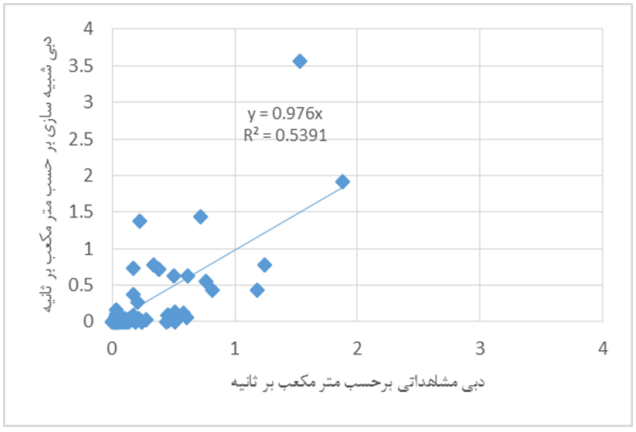
اعتبارسنجی مدل SWAT

بعد از مرحلهٔ واسنجی مدل، ارزیابی مدل نیز نتایج قابل قبولی را در پی داشت. در این مرحله، با توجه به پارامترهای کالیبراسیون بهینه شده برای منطقهٔ مطالعاتی، با استفاده از باقی‌مانده آمار (۲۰۰۷ - ۲۰۱۴) اقدام به شبیه‌سازی جریان رودخانه شد. نتایج نهایی اعتبارسنجی (جدول۳) که نتایج مدل در مرحله اعتبار سنجی NSE و R^2 به ترتیب ۰/۵۳ و ۰/۵۴ است. شکل ۵ که نمودار همبستگی مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی را در دوره اعتبارسنجی نشان می‌دهد حاکی از قابل قبول بودن نتایج می‌باشد.

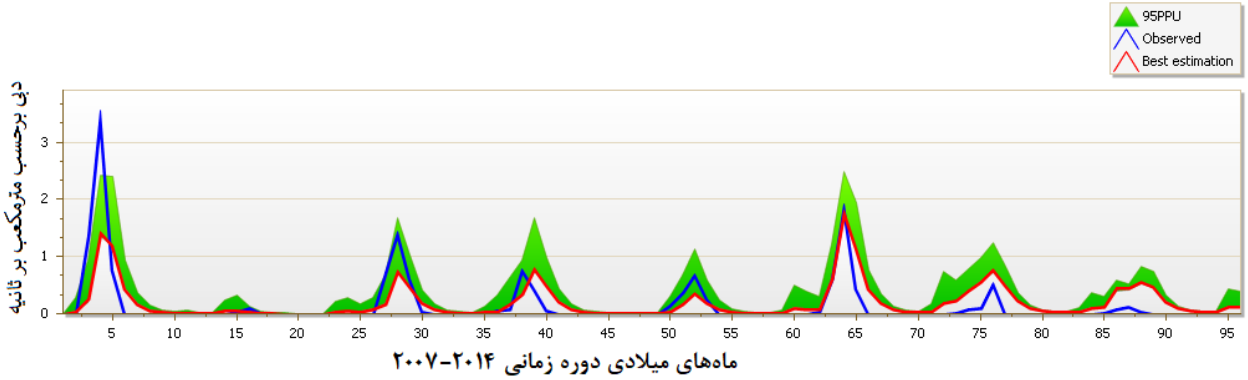
در روش SUFI-2 میزان عدم قطعیت توسط دو معیارِ P فاکتور و R–فاکتور محاسبه می‌گردد. P- فاکتور عبارتست از درصد داده‌های مشاهده‌ای که در باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار گرفته‌اند. این باند در سطوح ۲/۵ و ۹۷/۵ درصد از تابع توزیع تجمعی متغیر خروجی که با روش نمونه گیری لاتین هایپرکیوب به دست آمده، محاسبه می‌گردد (یعنی ۵ درصد از شبیه‌سازی‌ها که در دو انتهای تابع توزیع قرار دارند در نظر گرفته نمی‌شوند). از آنجا که اثر تمام منابع عدم قطعیت در متغیرهای خروجی (مانند دبی جریان یا بار رسوب) منعکس می‌شود، در این روش همه عدم قطعیت‌ها در نظر گرفته می شود، ولی تفکیک سهم منابع مختلف عدم قطعیت دشوار است و تاکنون روش قابل اطمینانی برای محاسبه آن ارائه نشده است.

شکل ۶، مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی در دوره اعتبارسنجی برای پایه زمانی ۲۰۰۷-۲۰۱۴ را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده کارآیی مدل در برآورد دبی می‌باشد.

دامنه ضرایب R^2 و NS به ترتیب اعداد جدول ۳ می‌باشدکه از ضعیف تا خیلی خوب طبقه‌بندی شده است.



شکل۵- نمودار همبستگی مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره اعتبارسنجی



شکل۶- مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در دوره اعتبارسنجی با پایه زمانی ماهانه

در پیش‌بینی وضع هیدرولوژیکی در مدل‌ها، مؤلفه‌های بیلان آبی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد [۱۷]. بیلان آبی حوضه جهت ثبت تغییرات آب در سیستم هیدرولوژیکی و سنجش کارآیی مدل با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و مشاهدات میدانی کاربرد دارد [۶]. در این خصوص مدل‌های هیدرولوژیکی نمایش ساده شده‌ای از سامانه هیدرولوژیکی واقعی هستند که به بررسی کارکرد حوضه در واکنش به ورودی‌های گوناگون و فهم بهتر از فرآیندهای هیدرولوژی کمک می‌کنند [۲۰].

جدول ۲- ارزیابی نهایی کارآیی مدل در دوره واسنجی و صحت سنجی

ایستگاه فخرآباد	نتیجه واسنجی				نتیجه صحت سنجی			
	NSE	R^2	P-factor	R-factor	NSE	R^2	P-factor	R-factor
	۰/۷۱	۰/۷۳	۰/۵۶	۰/۶۵	۰/۵۳	۰/۵۴	۰/۵۴	۰/۶۸

جدول ۳-دامنه ضرایب R^2 و NS (Donigian, 2000: Moriasi et al., 2007)

	POOR	Middle	Good	Very Good
R^2	<0.60	0.60-0.70	0.70-0.80	>0.80
NS	<0.50	0.50-0.65	0.65-0.75	>0.75

استفاده از مدل‌ها در برآورد رواناب سالانه حوزه‌های آبخیز مناطق خشک و نیمه‌خشک که اکثراً فاقد ایستگاه آب‌سنجی هستند، از دیرباز مورد توجه محققان هیدرولوژی بوده است. مدل‌های ارائه شده حاصل تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به یک منطقه با شرایط خاص جغرافیایی بوده و درصورت واسنجی قابل تعمیم به سایر مناطق می‌باشد. با توجه به مطالب بیان شده، بیلان آب حوزه آبخیز فخرآباد با استفاده از مدل برآورد شد.

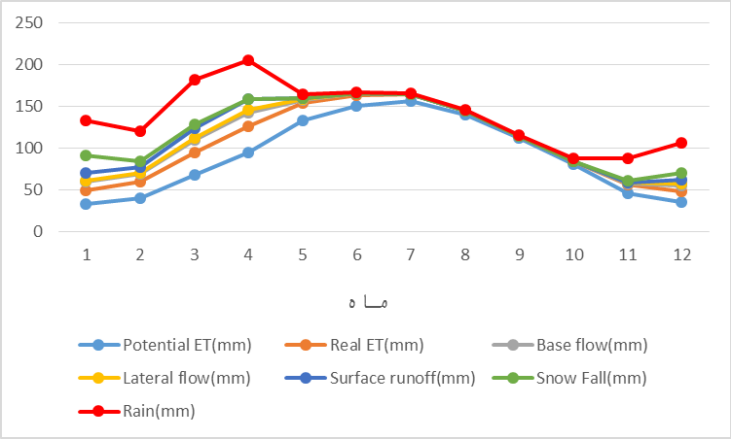
تمامی مؤلفه‌های بیلان آبی نظیر بارش، برف، رواناب سطحی، تبخیر-تعرّق، جریان زیرسطحی و جریان آب زیرزمینی در منطقه با این مدل شبیه‌سازی شد. متوسط مقادیر اجزای بیلان آبی حوزه آبخیز فخرآباد، بر اساس نتایج شبیه‌سازی مدل برای دوره زمانی ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۴ در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. درجدول ۴ متوسط اجزای بیلان برای هر ماه ذکر گردیده است.

جدول ۴- متوسط ماهانه اجزای بیلان آبی حوزه آبخیز فخرآباد در دوره ۱۹۹۸-۲۰۱۴

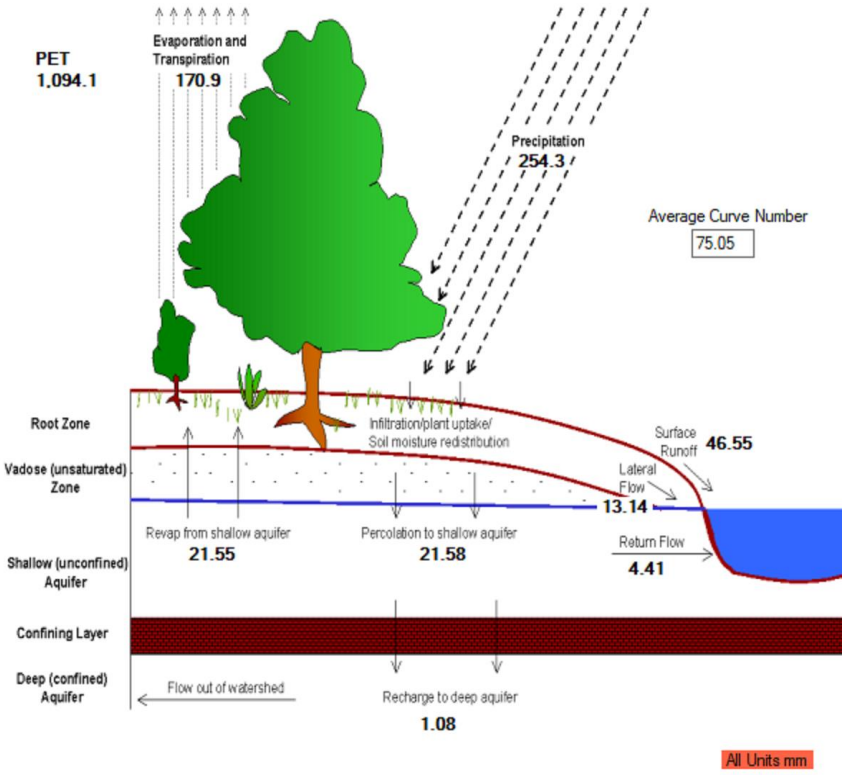
Mon	Rain (mm)	Snow Fall (mm)	Surface runoff (mm)	Lateral flow (mm)	Base flow (mm)	Real ET (mm)	Potential ET (mm)
Jan	41.63	21.36	8.9	1.53	10.49	16.15	33.49
Feb	35.88	7.09	6.48	1.76	8.65	20.14	40.21
Mar	53.69	4.44	11.9	2.36	15.05	27.03	68.21
Apr	47.07	0.32	12.81	2.8	16.72	31.35	94.82
May	5.50	0.00	0.09	1.66	3.14	21.5	133.3
Jun	1.56	0.00	0	0.51	1.64	13.21	150.84
Jul	0.52	0.00	0	0.16	0.42	7.46	157.19
Aug	0.57	0.00	0	0.05	0.17	4.49	140.83
Sept	0.45	0.00	0	0.02	0.1	2.94	112.12
Oct	3.37	0.00	0.01	0.05	0.13	3.31	80.86
Nov	27.05	1.37	0.93	0.62	1.59	10.02	46.14
Dec	36.68	7.12	5.36	1.61	7.01	13.18	35.76

براساس جدول ۴، نتایج نشان داد که تغییرات زمانی جریان پایه در طول سال نسبتاً کمتر است. بیشترین مقدار این متغیر در ماه آوریل (فروردین) هم زمان با شروع ذوب برف مشاهده می‌شود. در مورد متغیر آبدهی که مجموع رواناب سطحی و جریان پایه است، بیشترین مقدار مربوط به ماه آوریل می‌باشد. تغییرات تبخیر و

تعرّق پتانسیل در طول سال با دما ارتباط تنگاتنگی دارد. بیشترین تبخیر و تعرق پتانسیل در ماه‌های ژوئن تا آگوست (خرداد تا مرداد) مشاهده می‌شود و ماه‌های سرد (نوامبر تا فوریه؛ آبان تا بهمن) کمترین میزان تبخیر و تعرّق پتانسیل را دارند. تعرّق واقعی شامل تبخیر از خاک، تعرّق گیاه و ربایش توسط تاج پوشش گیاهی است. بنابراین، تغییرات سالانه این متغیر متأثر از بارش، رطوبت خاک و دماست. بیشترین مقادیر تبخیر تعرّق واقعی مربوط به ماه‌های آوریل و (فروردین) است که رطوبت بیشتری برای تبخیر وجود دارد و دما نیز نسبتاً زیاد است.



شکل ۷- متوسط ماهانه اجزای بیلان آبی حوزه آبخیز فخرآباد در دوره ۲۰۱۴-۱۹۹۸



شکل ۸- متوسط مقادیر اجزای بیلان آب حوزه آبخیز فخرآباد در دوره سال‌های ۲۰۱۴-۱۹۹۸ توسط مدل SWAT

همان طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود میانگین بارش حوزه آبخیز مطالعاتی ۲۵۴/۳ میلی‌متر است. به‌طور متوسط حدود ۶۷ درصد بارش از طریق تبخیر و تعرّق وارد جو می‌شود، حدود ۲۳ درصد آن به‌صورت رواناب سطحی و جریان زیرسطحی به‌طور مستقیم به آبراهه‌ها وارد می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مدل

SWAT با دقّت قابل قبولی اجزای بیلان آبی حوزه آبخیز فخرآباد را شبیه‌سازی کرده است.

با توجه به این که بیلان منفی آب در یک حوزه آبخیز نشان‌دهندهٔ هدر رفت ذخایر آب موجود در خاک و منابع آب زیرزمینی، از طریق نفوذ عمقی و تبخیر و تعرّق می‌باشد، در این منطقه سهم تبخیر و تعرّق در هدر رفت آب نسبت به سایر اجزای بیلان بیشتر است.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از اوّلین اجرای مدل SWAT و بررسی شاخص‌های ارزیابی دقّت شبیه‌سازی این مدل نشان می‌دهند که مدل SWAT در اوّلین اجرا و با مقادیر پیش فرض پارامترها، توانسته است زمان وقوع دبی‌های اوج را از نظر انطباق با زمان ماه‌های پر باران و دبی‌های اوج واقعی، مدل‌سازی کند. با توجّه به پایین‌بودن شاخص‌های ارزیابی و برآورد غیر قابل قبول نسبت به مقادیر واقعی، شبیه‌سازی دبی رواناب حوزه آبخیز فخرآباد در این مرحله مناسب نمی‌باشد و واسنجی مدل می‌تواند نتایج را بهبود بخشد و باعث افزایش دقت شبیه‌سازی شود. بنابراین پس از این مرحله، اقدام به واسنجی مدل به‌منظور بهبود دقّت شبیه‌سازی دبی رواناب حوزه آبخیز فخرآباد گردید.

با اجرای مدل فیزیکی SWAT-CUP در حوزهٔ فخرآباد امکان شبیه‌سازی جریان ماهانه دوره مورد مطالعه در این حوزه فراهم گردید. مقایسه آماری این مدل‌سازی نتایج تقریباً قابل قبولی را نشان داده است، به‌طوری‌که مقایسه آماری هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی به کار رفته در این تحقیق با معیار نش‌ساتکلیف همبستگی حدود ۷۱ درصدی هیدروگراف‌ها را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان چنین استنباط نمود که مدل فیزیکی SWAT با توجّه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی، در حوزهٔ فخرآباد کارآیی قابل قبولی دارد.

با مقایسهٔ ظاهری و آماری هیدروگراف مشاهداتی و هیدروگراف شبیه‌سازی شده توسط مدل، مشخص گردید شباهت زیادی بین هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در دوره شبیه‌سازی منطقه مورد مطالعه وجود دارد. در مورد ویژگی‌های مهم هیدروگراف از قبیل دبی پیک، حجم رواناب و زمان رسیدن به دبی اوج، بین دو هیدروگراف تطابق مناسبی وجود دارد.

بررسی شاخص‌ها و نمودارهای به دست آمده در مرحلهٔ واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای شبیه‌سازی دبی رواناب ماهانه، نشان می‌دهد که مدل در مرحله واسنجی موفق‌تر عمل کرده است. به دلیل مقادیر بالای شاخص‌های ارزیابی و شبیه‌سازی بسیار خوب دبی‌های پایه زمان و زمان وقوع دبی‌های اوج، نتایج مدل‌سازی مطلوب می‌باشد. به‌طور کلی نتایج به دست آمده نشان دهنده توانایی و دقت قابل قبول مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی رواناب ماهانه حوزه آبخیز فخرآباد می‌باشد. یافته‌های این تحقیق، نتایج مطالعاتی که به‌طور کلی توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی جریان رودخانه در حوزه‌های مورد مطالعه را رضایت‌بخش اعلام کردند، تأیید می‌کند [۱۸، ۱۲، ۱۶، ۱۷].

بر اساس نتایج آنالیز حساسیت ۱۶ پارامتر مؤثر بر رواناب در مدل SWAT، شناخته شد که پارامترهای شماره منحنی (CN2)، ضریب آلبدوی خاک مرطوب (SOL_BD)، ضریب مانینگ برای جریان سطحی (OV_N) و فاکتور جبران تبخیر در خاک (ESCO) از پارامترهای بسیار مهم در تعین میزان دبی رواناب خروجی از حوضه شناخته شدند که از بین آنها عامل شماره منحنی (CN2)، به عنوان حساس‌ترین پارامتر تشخیص داده شد.

در این تحقیق نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل، کارآیی قابل قبول آن در برآورد بیلان آبی در حوزه آبخیز فخرآباد را نشان داد. با توجّه به قرارداشتن حوزه آبخیز فخرآباد در ناحیه خشک، این منطقه از میزان تبخیر و تعرق بالایی برخوردار است. تبخیر و تعرق ۶۴ درصد، بیشترین سهم تلفات بارش سالانه در منطقه را تشکیل می‌دهد. پس از تبخیر و تعرّق، رواناب سطحی ۲۰ درصد، جریان زیرسطحی ۳ درصد سایر سهم باقیمانده بارش را تشکیل می‌دهند.

با توجّه به این که تبخیر و تعرّق بیشترین سهم تلفات بارش سالانه در منطقه را تشکیل می‌دهد، بنابراین اقدامات جدّی در راستای جلوگیری از هدر رفت آب از طریق تبخیر و تعرّق در منطقه ضروری به نظر می‌رسد. همچنین

از این نتایج برای پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم و اقدامات مدیریتی قابل اجرا در منطقه که به صورت سناریوهایی به مدل ارائه می‌شود استفاده نمود.

References

[1]. Aritmani, M.M., Zynivand, H., Tahmasbi Pour, N., & Haghizadeh. A. (2017). Evaluation of SWAT model in determining the water balance components of Gamasiab basin. *Journal of Rainwater Catchment Systems*. 5 (2), 51-64, (in Farsi).

[2]. Faramarzi, M., Abbaspour, K.C., Schulin, R., & Yang. H. (2009). Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes*, 23 (3), 486–501.

[3]. Havrylenko, S.B., Bodoque, J.M., Srinivasan, R., Zucarelli, G.V. & Mercuri. P. (2016). Assessment of the soil water content in the Pampas region using SWAT. *Catena*, 137, 298-309.

[4]. Hosseini, M. (2014). Simulation of water balance in Qarasu watershed, Kermanshah using SWAT model. *Journal of Watershed Management Engineering and Management*, 6 (1), 63-73, (in Farsi).

[5]. Hayatzadeh, M. & Mousavi, U. (2018). Modeling the effect of climate change and land use change on the hydrological conditions of the watershed. 13th National Conference on Watershed Management Science and Engineering and 3rd National Conference on Protection of Natural Resources and Environment with a Focus on Watershed Management and Protection of Natural Resources and Environment, Ardabil, (in Farsi).

[6]. Moradipour, Sh., Zinivand, H. Bahramand, A. R. & Najafinejad, A. (2011). Watershed scale simulation at the watershed scale using hydrological-distribution model and GIS. 7th National Conference on Watershed Management Science and Engineering, Isfahan University of Technology, (in Farsi).

[7]. Mahdavi, M. & Azarakhshi. M. (2005). Determining the appropriate monthly water balance in small watersheds of the country) Case study: East Azarbaijan and North Khorasan provinces, *Iranian Journal of Natural Resources*, 415-427, (in Farsi).

[8]. Neitch, S.L., Arnold Kiniry, J.G. & Williams. J.R. (2005). Soil and water assessment tool documentation, user's manual, Temple, Texas, USA, 494 pages.

[9]. Nouri, Z. Talebi, A. & Asadi, M. A. (2019). Study of the efficiency of SWAT model in determining the components of the water balance of the basin (Case study: Mehrgerd watershed of Semirom). *Iranian Journal of Water Resources Research*. 3, 133-143, (in Farsi).

[10]. Nekounam, Z. & Mazidi. A. (2010). Snow cover analysis in Fakhrabad basin of Yazd. Fourth International Congress of Geographers of the Islamic World, (in Farsi).

[11]. Parvizi, S., Talebi, A., Malekinejad, H & Sadeghi. M. (2020). Investigation of climate change on some hydrological parameters of Jamishan watershed using SWAT model. *Journal of Environment and Water Engineering*, 4, 443-430. (in Farsi).

[12]. Parvizi, S. (2017). Location of Yazrzamini Dam using Model Water Balance Simulator (SWAT) and Network Analysis Process (ANP) of the study area: Jamishan Basin, Kermanshah Province). Master Thesis in Natural Resources Engineering-Watershed Management, Yazd University, (in Farsi).

[13]. Uniyal, B., Jha, M.K. & Verma, A.K. (2015). Parameter identification and uncertainty analysis for simulating streamflow in a river basin of Eastern India, *Hydrological Processes*, 29 (17), 3744-3766.

[14]. Rivas-Tabares, D., Tarquis, A N., Willaarts, B. & Miguel, A. (2019). An accurate evaluation of water availability in sub-arid Mediterranean watersheds through SWAT: Cega-Eresma-Adaja. *Journal of Agricultural Water Management*, 212, 211-225.

[15]. Remegio, B. & Confesor, J. (2007). Sensitivity analysis and interdependence of the SWAT model parameters. Written for presentation at the 2007 ASABE Annual International Meeting Sponsored by American Society of Agricultural and Biological Engineers Minneapolis Convention Center, Minneapolis, Minnesota

[16]. Shimelis, G., Setegn, Bijan Dargahi., Ragahvan, Srinivasan & Assefa, M. Melesse. (2010). Modeling of sediment yield from Anjeni-Gauged watershed, Ethiopianusing SWAT model. *Journal of the American JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, *46*(3), 514-526.

[17]. Xu, Z. X., Pang, J. P., Liu, C. M. & Li, J. Y. (2009). Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SAWT model. *Hydrological Processes*, 23, 3619-3630.

[18]. Zahedi, E. (2013). Determination of susceptible areas for construction of Yazrzmini dam using water balance simulator (SWAT model) and network analysis process (ANP) (study area: Darngar Dargaz watershed). Master Thesis in Natural Resources Engineering-Watershed Management, Yazd University. (in Farsi).

[19]. Zare Garizi, A., Talebi, A. & Faramarzi, M. (2018). Identification and prioritization of watershed critical areas in terms of erosion and sediment with SWAT model. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 8(4), 350-361.

[20]. Zynivand. H. (2010). Simulation of spatial distribution of soil erosion and sediment at the watershed scale. Sixth National Conference on Watershed Management Science and Engineering. Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University. (in Farsi).

Investigation of the water balance of Fakhrabad watershed using SWAT model (Research Paper)

1- Sara Parvizi*, Ph.D. Student in Soil and Water Conservation, Yazd University, Yazd, Iran.
Saraparvizi90@yahoo.com
2- Ali Talebi, Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran.
3- Alireza Mandegar, Master of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Received: 03 Nov. 2021
Accepted: 26 May 2022

Abstract

Water resources management, especially in watersheds without statistics all data, requires the recognition of hydrological processes, especially runoff, as one of the most important and most practical phases of the hydrological cycle. The aim of this study was to determine the efficiency and usability of the SWAT model in simulating the water balance of the Fakhrabad watershed. For the initial implementation of the model, the data required for the model implementation include meteorological data (precipitation, minimum and maximum temperature, relative humidity, and wind speed), baseline maps of the region (digital elevation map, land use, slope and soil map) and monthly discharge data of Fakhrabad hydrometric station. Were used. After the initial implementation of the SWAT model, the output was called to SWAT-CUP software for calibration and validation after sensitivity analysis, the model was implemented to determine the sensitive parameters and the results were reviewed. Calibration and validation were performed for the period 1998-2014 and the accuracy of monthly runoff simulation using the coefficient of determination (R^2) and Nash Sutcliffe (NSE) for the calibration phase of 0.73 and 0.71 and for the validation phase of 0.54 and 0.53 was obtained. Acceptable values were also obtained for the uncertainty assessment indicators. P-factor and R-factor were 0.56 and 0.65 for the calibration period and 0.54 and 0.68 for the validation period, respectively. The final results showed that on average of 67% of precipitation enters the atmosphere through evapotranspiration, 23% enters the canals as surface run off and subsurface flow. The results show the efficiency of the SWAT model in simulating the water balance of Fakhrabad watershed and helps to more accurately programing water resources in this basin.

Keywords: Evaporation and transpiration, Hydrological model, Surface Runoff, SUFI2 algorithm.