نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۲، شماره ۵، آذر – دی ۱۳۹۷، ص. ۸۶۳-۸۴۹

Journal of Water and Soil
Vol. 32, No. 5, Nov.-Des. 2018, p. 849-863

ارزیابی مدل هیدرولوژیک SWAT در شبیه‌سازی بیلان آب در حوضه‌های آبریز مناطق نیمه‌خشک (مطالعه موردی: حوضه آبریز زاینده‌رود)

محمدامین امینی[1*]- غزاله ترکان[2]- سیدسعید اسلامیان[3]- محمدجواد زارعیان[4]- علی اصغر بسالت پور[5]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۰۷

چکیده

شبیه‌سازی و برآورد مؤلفه‌های بیلان آب از جمله اقدامات مورد نیاز جهت برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع آب در سطح حوضه‌های آبریز می‌باشد. مدل SWAT یکی از مدل‌های نیمه توزیعی برای شبیه‌سازی حوضه آبریز است که به نحو مطلوبی از ویژگی‌های فیزیکی حوضه برای محاسبه بیلان آب استفاده می‌کند. در پژوهش حاضر از این مدل جهت شبیه‌سازی بیلان آب درحوضه آبریز زاینده‌رود استفاده شده است. با وجود این که در زمینه استفاده از این مدل در بررسی‌های مربوط به حوضه‌های آبریز مطالعات گسترده‌ای انجام گرفته است ولی به دلیل ناکافی بودن و دقت پایین اطلاعات مکانی از جمله نوع خاک، نوع کاربری اراضی، همچنین پراکندگی و تعداد ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری مورد استفاده جهت واسنجی و اجرای مدل، لزوم مطالعات دقیق‌تر در این زمینه به نظر می‌رسد. از این رو، از اطلاعات ۲۷ کلاس کاربری اراضی، ۵۷ کلاس بافت خاک و ۲۷ ایستگاه هواشناسی شامل داده‌های روزانه بارش و دمای حداقل و حداکثر استفاده گردید. همچنین تحلیل حساسیت، واسنجی (۲۰۰۰– ۲۰۰۶) و صحت‌سنجی (۲۰۰۷– ۲۰۰۹) مدل با استفاده از الگوریتم SUFI2 در برنامه SWAT-CUP و با بکارگیری از داده‌های ۶ ایستگاه هیدرومتری به صورت ماهانه انجام شد. نتایج حاصل از بکارگیری از این مدل واسنجی شده در حوضه آبریز زاینده‌رود نشان داد که از کل بارش سالانه ورودی به حوضه ۶۵/۹۸ درصد به صورت تبخیر و تعرق از حوضه خارج می‌گردد که دارای بیش‌ترین سهم در میان اجزای بیلان آب می‌باشد. همچنین رواناب سطحی با ۱۵ درصد، جریان آب زیرزمینی با ۱۳/۷ درصد، جریان جانبی با ۱/۵ درصد و تغذیه آبخوان عمیق با ۰/۸ درصد به‌ترتیب سایر بخش‌های بیلان آب را در این حوضه تشکیل می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم SUFI2، تحلیل حساسیت، صحت‌سنجی، واسنجی، SWAT-CUP

مقدمه

نقش آب در زندگی بشر به عنوان یک ماده حیاتی برای توسعه اقتصادی، رشد کشاورزی و صنعت با توجه به رویکرد افزایش جمعیت و توسعه شهرنشینی انکارناپذیر است. امروزه بسیاری از مناطق جهان با کمبود آب شیرین و آلودگی آب مواجه هستند از این رو، دسترسی و استفاده پایدار از منابع آب به چالشی مهم در جهان بدل گردیده که نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و آینده‌نگرانه در این زمینه می‌باشد.

شناخت و درک مفهوم بیلان آب[6] یکی از پیش نیازهای ضروری در راستای مدیریت پایدار منابع آب در سطح حوضه‌های آبریز می‌باشد. این مفهوم به بررسی تبادلات آب در یک محدوده براساس اصل بقای ماده در چرخه آب تأکید دارد. بر طبق این تعریف، کلیه آب‌هایی که در یک زمان معین وارد یک محدوده خاص می‌گردند، به مصرف رسیده، ذخیره شده و یا به صورت‌های مختلف از محدوده مشخص شده خارج می‌گردد که مجموعه بیلان را تشکیل می‌دهند. مهم‌ترین عناصر بیلان آب از دیدگاه مدیریت منابع آب شامل بارش، تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، جریان آب زیرزمینی و جریان جانبی

۱ و ۲- دانشجویان دکتری منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
(*- نویسنده مسئول: Email: Aminiamin2016@gmail.com)
۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان
۴- دکتری آبیاری و زهکشی، مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو
۵- دکتری علوم خاک، مؤسسه Inter3 برلین آلمان
DOI: 10.22067/jsw.v32i5.68815

6- Water balance

می‌باشند. بنابراین، می‌توان اجزاء منابع آب موجود در یک سیستم را در دوره‌های زمانی مختلف، مورد مقایسه قرار داده و درجه تأثیر هر یک را در تغییرات بیلان آبی سیستم‌های هیدرولوژیکی شناسایی کرد (۱۶).

امروزه برای مطالعه و برنامه‌ریزی پایدار و مؤثر در مدیریت جامع حوضه‌های آبریز، از مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. SWAT[1] نمونه‌ای از مدل‌های هیدرولوژیک با مبنای فیزیکی است که بر اساس ویژگی‌های حوضه آبریز و شرایط اقلیمی آن به شبیه سازی در مقیاس بزرگ و همچنین پایش فرآیندهای مرتبط با چرخه آب می‌پردازد (۱۴).

محققین بسیاری مدل SWAT را برای تحلیل مسائل مربوط به حوضه آبریز در جهان مورد استفاده قرار داده‌اند.

فرامرزی و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه‌ای با استفاده از مدل SWAT اجزای بیلان آب شامل جریان آب آبی، جریان آب سبز و ذخیره آب سبز را در مقیاس زیرحوضه و در مقیاس زمانی ماهانه را در سراسر ایران شبیه‌سازی کردند. ایشان در مطالعه خود با استفاده از دبی رودخانه‌ها، مدل هیدرولوژیک ایران را صحت‌سنجی و واسنجی نمودند. نتایج برای اکثر رودخانه‌های کشور قابل قبول بوده و نشان داد که لحاظ کردن عملیات آبیاری، اثر معنی‌داری بر محاسبه بیلان آب در استان‌های دارای زراعت آبی دارد. همچنین نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که مناطقی که در آن‌ها دخالت بشر (مانند ساخت سدها، مخازن، جاده‌ها، تونل‌ها و فعالیت صنعتی) زیاد بوده، بدترین نتایج واسنجی را دارا بوده و عدم قطعیت بیشتری در این نواحی مشاهده شده است (۳). آدگان و همکاران (۲۰۱۴) از مدل SWAT برای شبیه‌سازی بیلان آب حوضه آبریز جبیا (۱۲۹۹۲ km^2) واقع در شمال نیجریه استفاده کردند. خروجی مدل آن‌ها نشان دهنده انطباق مطلوب بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده داشت، به نحوی که شاخص‌های NSE و R^2 محاسبه شده برای هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی، بیشتر از ۰/۷ به دست آمد. آنها همچنین گزارش کردند که مدل SWAT می‌تواند یک ابزار مؤثر برای پیش‌بینی بیلان آب و عملکرد آب[2] در مدیریت پایدار منابع آب باشد (۲). قورابا (۲۰۱۵) مؤلفه‌های هیدرولوژیک حوضه آبریز سد سیملی در پاکستان را با استفاده از SWAT مدل‌سازی کردند. واسنجی مدل از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۱ و صحت‌سنجی از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۱ انجام شد. بر اساس ضریب تعیین (R^2)، عملکرد مدل برای هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی قابل قبول گزارش شد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که اگر مدل SWAT به درستی کالیبره شده باشد، می‌تواند برای سیاست‌های مدیریت آب در مناطق نیمه خشک به طور مؤثر استفاده شود (۶). جورج و ساتیان (۲۰۱۶) رفتار هیدرولوژیک زیرحوضه کورومالی در حوضه رودخانه کاراوانور در هند را به وسیله مدل SWAT شبیه‌سازی کردند. کارایی مدل توسط ضریب ناش‌ساتکلیف (NSE) و ضریب تعیین (R2) سنجیده شد، به نحوی‌که این مقادیر برای دوره واسنجی به ترتیب ۰/۸۸ و ۰/۹۶ و برای دوره صحت سنجی ۰/۹۰ و ۰/۹۹ محاسبه گردید. به علاوه، نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که سهم پارامتر جریان آب زیرزمینی ۶۴٪ جریان جانبی ۱۲٪ و رواناب سطحی ۹٪ از بارندگی سالانه می‌باشد (۵). شفیعی و همکاران (۱۳۹۲) از مدل نیمه توزیعی SWAT در حوضه نیشابور با مساحت ۹۳۵۰ کیلومتر مربع برای شبیه‌سازی جریان در یک دوره ۸ ساله استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد استفاده از مدل‌های نیمه-توزیعی به دلیل پیچیدگی سیستم هیدرولوژیک در منطقه مورد مطالعه از نتایج مطلوبی برخوردار نمی‌باشد (۱۷). گلشن و همکاران (۱۳۹۴) کارایی مدل SWAT را در شبیه‌سازی رواناب حوضه آبخیز هراز شامل زیرحوضه‌های کره‌سنگ، رزن، چلاو و پنجاب با مساحت‌های مختلف ارزیابی کردند. آن‌ها به‌منظور تحلیل حساسیت، از الگوریتم SUFI2 برای پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی رواناب منطقه استفاده نمودند. نتایج ایشان حاکی از دقت بالای مدلSWAT در شبیه‌سازی زمان وقوع و میزان دبی اوج در ایستگاه‌های بررسی شده بود (۸). حسینی و همکاران (۱۳۹۵) از مدل SWAT به‌منظور برآورد جریان زیرزمینی در ۶ حوضه جنوب غرب کشور شامل حوضه‌های گلگل، باغان، مرغاب، شکستیان، تنگ بریم، درآگاه استفاده نمودند. به‌جز حوزه شکستیان استان فارس، نتایج این پژوهش حاکی از کارآیی قابل قبول و مطلوب مدل در برآورد بیلان در حوضه‌های مورد مطالعه بود (۹). ضیایی (۱۳۹۵) با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS و با بکارگیری از الگوریتم SEBAL به تحلیل عددی اجزای بیلان آب در حوضه زاینده‌رود پرداختند، نتایج ایشان نشان داد که میانگین بارش سالانه، رواناب، تبخیر و تعرق و تغذیه به ترتیب ۶۲۹۸، ۱۶۹۵، ۴۴۸۴ و ۸۸/۸۴ میلیون متر مکعب برای سال ۲۰۱۳ می‌باشد (۱۹). کوهستانی (۱۳۹۵) از مدل SWAT برای پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های منابع آب (آب آبی و سبز) در حوضه زاینده‌رود در سه دوره اقلیمی پایه، آینده بلند مدت (۲۱۰۰–۲۰۲۰) و آینده دور (۲۱۰۰–۲۰۶۰) استفاده نموده و جهت انجام تحلیل حساسیت، واسنجی و تحلیل عدم قطعیت از الگوریتم SUFI2 استفاده نمود. نتایج نشان داد که مدل SWAT دقت قابل قبولی برای شبیه‌سازی رواناب ماهانه در مرحله واسنجی داشت و مقادیر شاخص‌های آماری، توانایی مناسب مدل در شبیه‌سازی روند تغییرات جریان و رواناب را نشان دادند (۱۰).

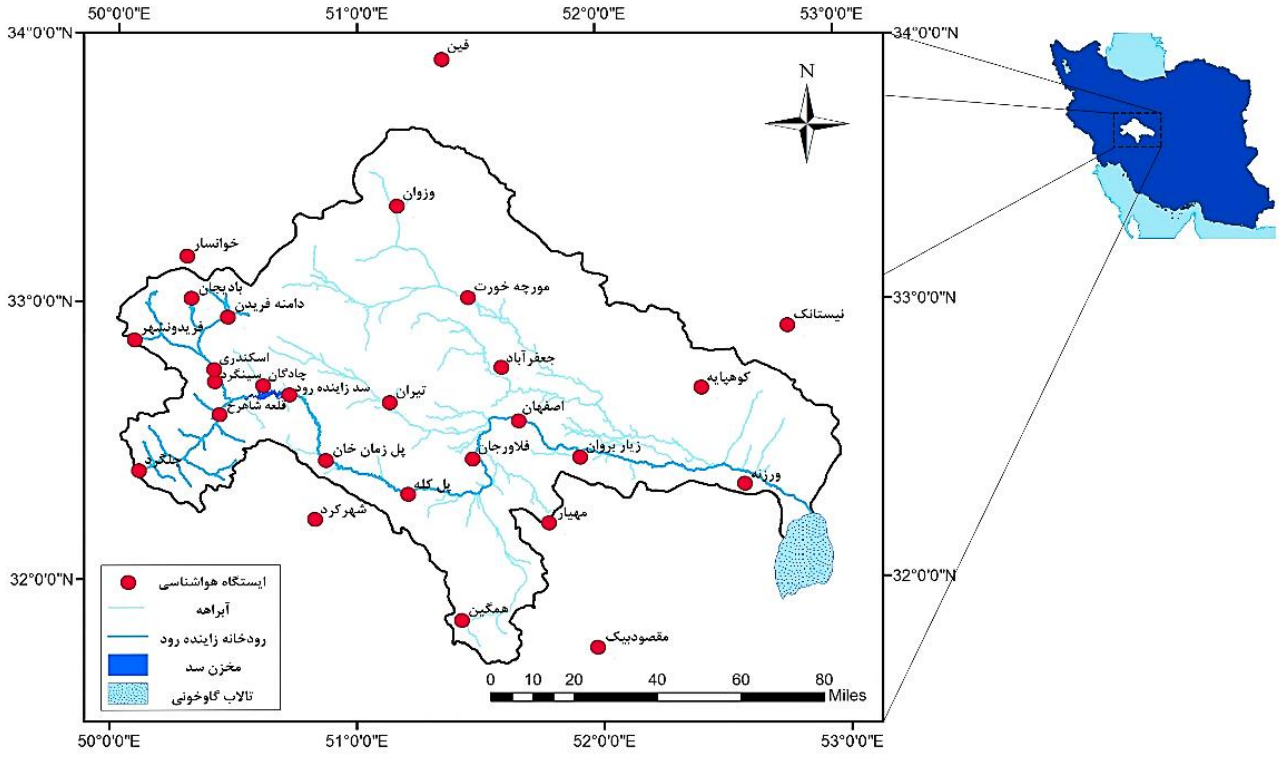
در پژوهش حاضر از مدل SWAT جهت شبیه‌سازی بیلان آب در حوضه آبریز زاینده‌رود استفاده شده است. با وجود این که در زمینه استفاده از این مدل در بررسی‌های مربوط به حوضه‌های آبریز مطالعات گسترده‌ای انجام گرفته است ولی به دلیل ناکافی بودن و

1- Soil and Water Assessment Tool
2- Water yield

دقت پایین اطلاعات مکانی از جمله نوع خاک، نوع کاربری اراضی، همچنین پراکندگی و تعداد ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری مورد استفاده جهت واسنجی و اجرای مدل، لزوم مطالعات دقیق‌تر در این زمینه به نظر می‌رسد. از این رو، در این مطالعه تلاش شده است با نگاهی دقیق‌تر بر عواملی که پیش‌تر گفته شد و همچنین استفاده از پارامترهای بیشتر در امر واسنجی مدل نسبت به مطالعات پیشین دقت نتایج حاصل از این مدل افزایش یابد. بدین منظور از اطلاعات ۲۷ کلاس کاربری اراضی، ۵۷ کلاس خاک، ۲۷ ایستگاه هواشناسی شامل داده‌های روزانه بارش و دمای حداقل و حداکثر، ۶ ایستگاه هیدرومتری و ۱۷ مؤلفه مؤثر بر رواناب در حوضه آبریز زاینده‌رود جهت واسنجی استفاده گردید. این حوضه یکی حوضه‌های آبریز بزرگ ایران است که در تأمین آب شرب، صنعت و کشاورزی پایین دست خود نقشی حیاتی دارد. از این رو، با توجه به توانایی مطلوب مدل SWAT برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیک حوضه آبریز، هدف اصلی در پژوهش حاضر شبیه‌سازی هیدرولوژیک با نگاهی جامع‌تر و همچنین برآورد بیلان آب در حوضه آبریز زاینده‌رود برای دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه

حوضه زاینده‌رود با مساحتی معادل ۲۶۹۱۷ کیلومتر مربع، در منطقه نیمه‌خشک مرکزی ایران و در میان عرض جغرافیایی ۳۱ تا ۳۴ شمالی و طول جغرافیایی ۴۹ تا ۵۳ درجه شرقی قرار دارد (۱۸). حوضه زاینده رود از شمال به حوضه آبریز دریاچه نمک، از غرب و جنوب غرب به حوضه آبریز کارون و دز، از شرق به حوضه آبریز دق سرخ و کویر سیاه کوه و از جنوب به حوضه آبریز شهرضا محدود می‌گردد. مرتفع ترین نقطه حوضه کوه کربوش با ارتفاع ۳۹۷۴ متر از سطح دریا و کم ارتفاع ترین نقطه حوضه تالاب گاوخونی با ارتفاع ۱۴۵۰ متر از سطح دریا می باشد (۱۱). حوضه زاینده‌رود شدیداً تحت تأثیر تغییرات بارندگی زیادی است، به‌طوری‌که ناحیه چلگرد در سمت غرب حوضه دارای بارش میانگین سالانه بیش از ۱۴۰۰ میلی‌متر بوده در حالی که در شرق حوضه و در کنار تالاب گاوخونی بارش سالانه از ۱۰۰میلی متر تجاوز نمی‌کند (۱۵). رودخانه زاینده‌رود بزرگ‌ترین رودخانه در این حوضه و همچنین فلات مرکزی ایران است که نقشی مهم و حیاتی در تأمین آب شرب، صنعت و کشاورزی منطقه مرکزی ایران دارد (۷). این رودخانه از کوه‌های زاگرس در غرب استان اصفهان سرچشمه گرفته و ضمن طی ۳۵۰ کیلومتر به سمت شرق به باتلاق گاوخونی در جنوب شرقی اصفهان می‌ریزد. شکل ۱ موقعیت کلی حوضه آبریز زاینده‌رود را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در حوضه آبریز زاینده‌رود

Figure 1- The location of studied meteorological stations in the Zayandeh-Rud River Basin

مواد و روش‌ها

SWAT یک مدل هیدرولوژیک نیمه‌توزیعی در مقیاس حوضه آبریز است. این مدل برای پیش‌بینی اثرات بلند مدت شیوه‌های مدیریت اراضی بر روی اجزای بیلان آب، رسوبات و عملکرد مواد شیمیایی کشاورزی در حوضه‌های آبریز بزرگ با شرایط متنوع مدیریتی، نوع خاک و کاربری اراضی توسعه داده شده است. برای دست‌یابی به این اهداف، در این مدل از اطلاعات مربوط به آب و هوا، ویژگی‌های خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و شیوه‌های مدیریت اراضی به جای استفاده از معادلات رگرسیونی به‌منظور توصیف رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی در حوزه آبریز، استفاده می‌شود. از این رو، فرآیندهای فیزیکی مرتبط با حرکت آب، حرکت رسوبات، رشد محصولات و چرخه مواد مغذی به طور مستقیم با استفاده از این داده ها توسط مدل شبیه‌سازی می‌شوند. این مدل یک مدل پیوسته زمانی است و در گام های زمانی ساعتی، روزانه و یا طولانی مدت (سالانه) اجرا می‌شود. چرخه هیدرولوژیکی که به وسیله مدل SWAT شبیه‌سازی می‌شود، بر پایه روابط پیوستگی بیلان آب است (۱۴):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t} \left(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}\right) \quad (۱)$$

که در رابطه فوق، t زمان (روز)، SW_t مقدار نهایی آب موجود در خاک (میلی‌متر)، SW_0 مقدار اولیه آب موجود در خاک (میلی‌متر)، R_{day} مقدار بارش در روز i ام (میلی‌متر)، Q_{gw} مقدار جریان برگشتی در روز i ام (میلی‌متر)، E_a مقدار تبخیر و تعرق در روز i ام (میلی‌متر)، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی در روز i ام (میلی‌متر) و W_{seep} مقدار آبی است که از پروفیل خاک به ناحیه غیر اشباع خاک در روز i ام وارد می‌شود (میلی‌متر).

در مدل SWAT دو روش برای تخمین رواناب سطحی وجود دارد: روش شماره منحنی (CN)[1] و روش نفوذ گرین و امپت[2]. در این پژوهش از روش شماره منحنی و طبق رابطه ۲ استفاده شده است:

$$Q_{surf} = \frac{\left(R_{day} - 0.2S\right)^2}{\left(R_{day} + 0.8S\right)} \quad (۲)$$

پارامتر S به صورت مکانی با تغییرات خاک، کاربری اراضی، مدیریت و شیب منطقه و به صورت زمانی با تغییرات آب موجود در خاک تغییر می‌کند. S به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود:

$$S = 25.4\left(\frac{1000}{CN} - 10\right) \quad (۳)$$

که در روابط فوق، Q_{surf} رواناب سطحی (میلی‌متر)، R_{day} عمق بارش روزانه (میلی‌متر)، S پارامتر نگهداشت رطوبت (میلی‌متر) و CN پارامتر خصوصیات حوضه از نظر نفوذپذیری می‌باشد. این پارامتر بی بعد بوده و تابعی از جنس زمین، پوشش گیاهی موجود و رطوبت خاک است.

مدل SWAT جریان زیرسطحی جانبی را در یک مقطع دو بعدی و در مسیر جریان به طرف پایین یک شیب تپه، شبیه‌سازی می‌کند. در برآورد موج جنبشی جریان زیرسطحی اشباع یا جریان جانبی، فرض می‌شود که خطوط جریان در منطقه اشباع با مرز غیراشباع موازی بوده و شیب هیدرولیکی برابر شیب کف است. در نهایت، دبی در خروجی از شیب تپه از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$Q_{lat} = 0.024\left(\frac{2SW_{ly.excess}\,K_{sat}\,Slp}{\Phi_d\,L_{hill}}\right) \quad (۴)$$

که در رابطه فوق، Q_{lat} دبی در خروجی تپه (میلی‌متر در روز)، $SW_{ly,excess}$ مقدار آب قابل زهکشی در لایه مورد نظر (میلی‌متر)، K_{sat} هدایت هیدرولیکی اشباع (میلی‌متر در ساعت)، slp شیب (ارتفاع در واحد فاصله)، Φ_d تخلخل قابل زهکشی خاک (میلی‌متر بر میلی‌متر) و L_{hill} طول تپه (متر) می‌باشند.

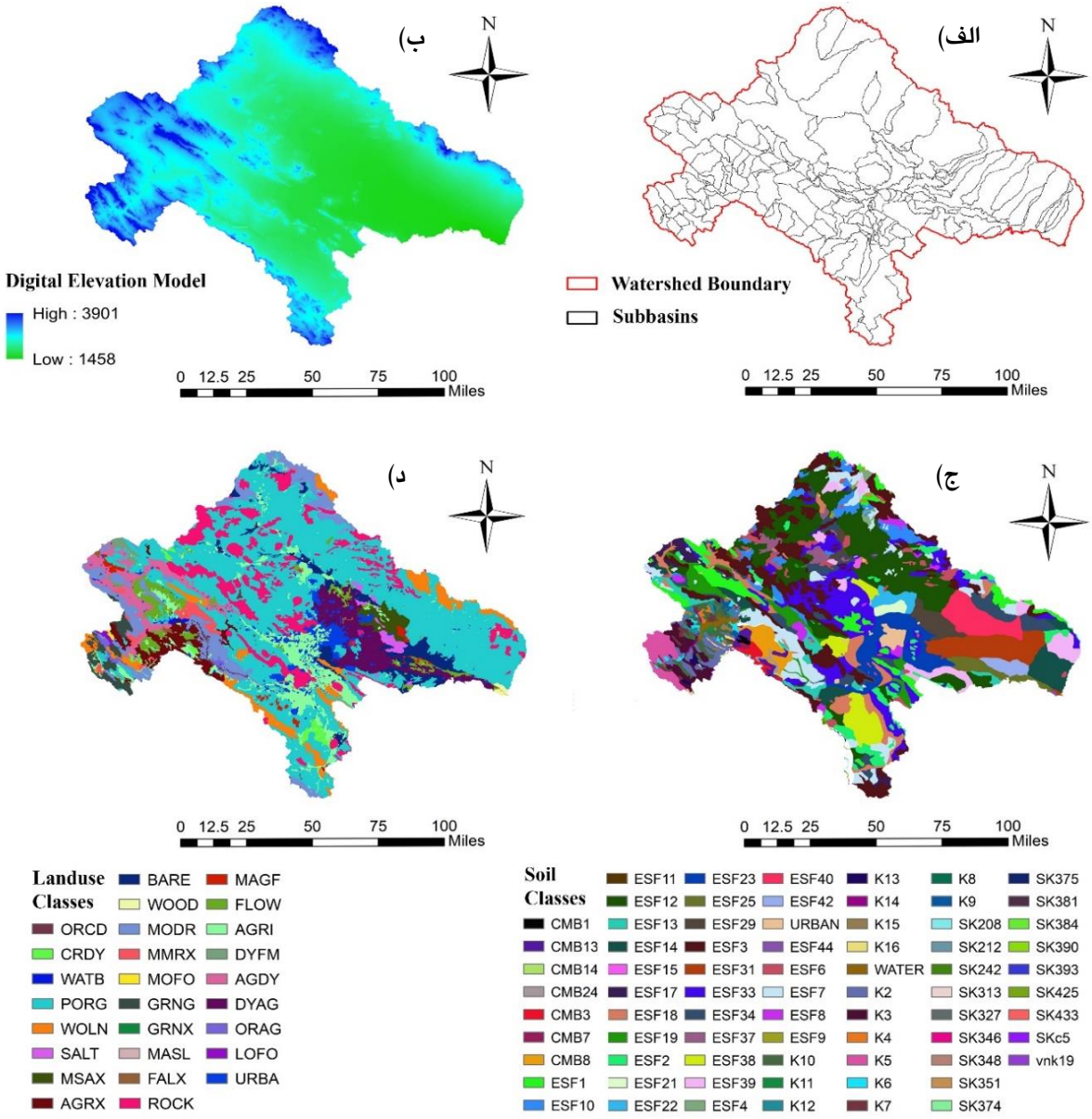
همچنین برای محاسبه جریان آب زیرزمینی (جریان پایه) از معادله ۵ استفاده می‌شود (۲):

$$Q_{gw.i} = Q_{gw.i-1}\,exp\left[-\alpha_{gw}\,\Delta t\right] + W_{rchg.sh}\left(1 - exp\left[-\alpha_{gw}\,\Delta t\right]\right) \quad (۵)$$

که در رابطه فوق، $Q_{gw,i}$ جریان آب زیرزمینی یا جریان پایه در روز i ام (میلی‌متر)، $Q_{gw,i-1}$ جریان آب زیرزمینی یا جریان پایه در روز i-1 ام (میلی‌متر)، α_{gw} ثابت کاهش جریان پایه، Δt زمان (روز) و $W_{rchg,sh}$ مقدار آب وارد شده به آبخوان کم عمق در روز i ام (میلی‌متر) می‌باشند.

مدل SWAT از سه روش گوناگون برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده می‌کند. این روش‌ها عبارتند از: هارگریوز– سامانی[3]، پریستلی– تیلور[4] و روش پنمن– مانتیس[5]. انتخاب و به‌کارگیری از هر یک از این روش‌ها به داده‌های اقلیمی موجود وابسته است. در این پژوهش از روش هارگریوز– سامانی که برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل تنها به پارامتر درجه حرارت و تابش خورشیدی دریافتی (وابسته به عرض جغرافیایی) نیاز دارد، استفاده شده است.

1- SCS Curve Number Method
2- Green and Ampt Method
3- Hargreaves-Samani
4- Priestley-Taylor
5- Penman-Monteith



شکل ۲- (الف) زیرحوضه‌ها، (ب) مدل رقومی ارتفاعی، (ج) نقشه خاک، (د) نقشه کاربری اراضی

Figure 2- (A) Sub-Basins, (B) Digital Elevation Model (DEM), (C) Soil Map, (D) Lanuse Map

اطلاعات مورد نیاز و مدل‌سازی

اطلاعات مورد نیاز برای شروع مدل‌سازی شامل اطلاعات مکانی و داده‌های هواشناسی هستند. در پژوهش حاضر ابتدا اطلاعات مکانی ورودی شامل لایه رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر، لایه کاربری اراضی شامل ۲۷ نوع کاربری و لایه خاک با ۷۳ نوع خاک (براساس گروه هیدرولوژیک خاک، تعداد لایه‌های خاک، مواد آلی خاک و...) به مدل فراخوانی شدند (شکل ۳). همچنین لایه شیب براساس توپوگرافی و خصوصیات فیزیوگرافی منطقه مطالعاتی به ۴ کلاس (۵-۰، ۱۰-۵، ۲۰-۱۰ و بیش از ۲۰ درجه) تفکیک گردید. در گام بعد، ابتدا شاخص‌های فیزیوگرافی مختلف حوضه آبریز از مدل رقومی ارتفاعی تعیین شده و سپس مرز حوضه آبریز با توجه به توپوگرافی منطقه ترسیم و حوضه آبریز به ۲۰۳ زیرحوضه تقسیم گردید. به منظور ایجاد واحدهای پاسخ هیدرولوژیک[1] (HRUs)، بدون در نظر گرفتن حد آستانه، از واحدهای پاسخ هیدرولوژیک غالب در هر

1- Hydrologic Response Unit

زیرحوضه برای آن زیرحوضه استفاده شد. از این رو، در مجموع ۲۰۳ واحد پاسخ هیدرولوژیک ایجاد گردید. این واحدها از نظر ویژگی‌های هیدرولوژیک (نوع کاربری اراضی، گروه هیدرولوژیک خاک و کلاس شیب) مشابه یکدیگر هستند و مبنای محاسبات مدل را تشکیل می دهند. در ادامه داده‌های هیدروکلیماتیک شامل داده‌های بارندگی، دمای کمینه و بیشینه، سرعت باد و رطوبت نسبی بر پایهٔ زمانی روزانه از ۲۷ ایستگاه هواشناسی (۲ ایستگاه هم‌دید[1]، ۷ ایستگاه باران‌سنجی، ۸ ایستگاه اقلیم‌سنجی و ۱۰ ایستگاه تبخیرسنجی) موجود در منطقه مطالعاتی به مدل وارد شد (شکل ۲). همچنین داده‌های مربوط به جریان از دو ایستگاه هیدرومتری واقع در شاخه اصلی رودخانه زاینده رود اخذ گردید. در پایان مدل به‌منظور شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب برای دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ اجرا شد.

تحلیل حساسیت

در مدل‌های هیدرولوژیک پارامترهای فیزیکی زیادی در حال اندرکنش هستند و اندازه‌گیری دقیق آن‌ها در حوضه‌های بزرگ امکان‌پذیر نیست و یا نیازمند صرف وقت و هزینه زیاد است. جهت دستیابی به این هدف بررسی کارایی مدل پیش از استفاده از آن از طریق آنالیز حساسیت، واسنجی و صحت‌سنجی ضروری است.

قدم اول در بررسی کارایی مدل انجام آنالیز حساسیت برای تعیین پارامترهای حساس در اجرای مدل به منظور واسنجی می‌باشد. از طریق آنالیز حساسیت، میزان تغییر در مقادیر خروجی مدل به ازای تغییر در میزان ورودی‌های آن محاسبه شده و پارامترهای حساس در اجرای مدل تعیین می‌گردد. روش‌های مورد استفاده برای انجام آنالیز حساسیت در حالت کلی به دو گروه تحلیل‌های موضعی و سراسری طبقه‌بندی می‌شوند. تحلیل موضعی که به روش OAT (یک فاکتور در یک زمان[2]) نیز شناخته می‌شود در حقیقت واکنش شبیه‌سازی مدل را به تغییرات پیوسته هر پارامتر در شرایط ثابت بودن سایر پارامترها مورد بررسی قرار می‌دهد (۱۲). در پژوهش حاضر آنالیز حساسیت از روش تحلیل موضعی انجام شد و نتایج حاصل با استفاده از آزمون t-test مورد ارزیابی قرار گرفت. این ارزیابی به دامنه پارامترها وابسته است.

در پژوهش حاضر به منظور واسنجی مدل از الگوریتم SUFI2[3] در چارچوب نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده شد. در این برنامه فرض می‌شود که هر پارامتر به طور یکنواخت در یک دامنه با عدم قطعیت معین توزیع شده است. الگوریتم SUFI2 طی ۹ گام اجرا می‌شود. مراحل واسنجی شامل: تعریف تابع هدف[4]، تعریف دامنه برای هر پارامتر، آنالیز حساسیت مطلق[5] برای همه پارامترها، تعیین دامنه عدم قطعیت اولیه برای هر پارامتر جهت نمونه‌برداری لاتین هایپر کیوب[6]، نمونه‌برداری به روش لاتین هایپر کیوب در هر مرحله اجرا، محاسبه تابع هدف برای هر مرحله شبیه‌سازی، محاسبه حساسیت نسبی، محاسبه عدم قطعیت و ارائه دامنه جدید برای هر پارامتر به منظور کاهش عدم قطعیت می‌باشند (۱). دامنه پارامترها به صورت تجربی و یا بر مبنای بررسی‌های انجام شده پیشین در منطقه مورد مطالعه انتخاب می‌شود. در الگوریتم SUFI2، ۷ تابع هدف متفاوت تعریف شده است و واسنجی مدل تا رسیدن مقادیر هر یک از توابع هدف به مقدار بهینه ادامه می‌یابد. در این پژوهش برای بهینه‌سازی تابع هدف از ضریب نش– ساتکلیف استفاده شد که از رابطه ۶ قابل محاسبه است:

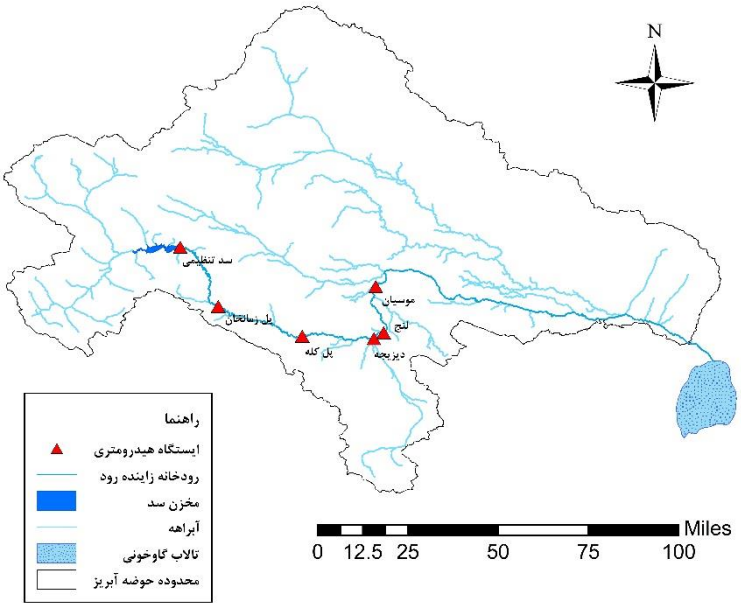
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{m.i} - Q_{s.i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{m.i} - \overline{Q_m})^2} \qquad (۶)$$

در رابطه فوق، n تعداد مشاهدات، Q_m و Q_s به‌ترتیب مقادیر رواناب اندازه‌گیری و برآورد شده (متر مکعب بر ثانیه) و $\overline{Q_m}$ و Q_s به ترتیب میانگین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده رواناب (متر مکعب بر ثانیه) می‌باشند. مقدار عددی ضریب NSE از منفی بی‌نهایت تا ۱ (مقدار بهینه) متغیر بوده و هر چه به ۱ نزدیک‌تر باشد بیان‌گر آن است که مدل برآورد بهتری داشته است. عموماً اگر شاخص نش– ساتکلیف بیشتر از ۰/۷۵ باشد کارایی مدل عالی، اگر بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ باشد رضایت بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد غیرقابل قبول فرض می‌شود (۱۳).

پس از واسنجی، صحت مدل با استفاده از پارامترهای به‌دست آمده در مرحله واسنجی و از مقادیر مشاهداتی که در مرحله واسنجی مورد استفاده قرار نگرفته است، سنجیده می‌شود. در صورت شبیه سازی قابل‌قبول، مدل برای کاربرد آماده خواهد بود.

در پژوهش حاضر از داده‌های اندازه‌گیری‌شده ۶ ایستگاه هیدرومتری سد تنظیمی، پل زمان‌خان، پل کله، دیزیچه، لنج و موسیان در مسیر رودخانه زاینده‌رود به منظور واسنجی و صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی مدل استفاده شده است. دوره زمانی شبیه‌سازی برای واسنجی (۱۹۹۸–۲۰۰۶) و برای صحت‌سنجی (۲۰۰۷–۲۰۰۹) انتخاب شد و مدل اجرا گردید که در آن سال‌های ۱۹۹۸ و ۱۹۹۹ به‌عنوان دوره تعادل‌جویی[7] به منظور دستیابی به عملکرد بهینه در واسنجی مدل تعیین شدند. موقعیت مکانی و مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب در حوضه آبریز زاینده‌رود به ترتیب در شکل ۳ و جدول ۱ ارائه گردیده است.

1- Synoptic station
2- One factor at a time
3- Sequential uncertainty fitting algorithm
4- Objective function
5- Absolute sensitivity analysis
6- Latin hypercube
7- Warm up



شکل ۳- موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه در حوضه آبریز زاینده‌رود

Figure 3- The location of studied hydrometric stations in the Zayandeh-Rud River Basin

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب برای واسنجی و صحت‌سنجی در حوضه‌آبریز زاینده‌رود

Table 1- Specifications of selected hydrometric stsaions for calibration and validation in Zayandeh-Rud River basin

شماره No.	نام ایستگاه Station	ارتفاع از سطح دریا (متر) Elevation (m)	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude
1	سد تنظیمی	2130	32.7188	50.7846
2	پل زمان‌خان	1880	32.4983	50.8947
3	پل کله	1715	32.3794	51.2313
4	دیزیچه	1653	32.3697	51.5188
5	لنج	1646	32.3933	51.5575
6	موسیان	1600	32.5769	51.5261

نتایج و بحث

نتایج بدست آمده از تحلیل حساسیت نشان داد که با توجه به ویژگی‌های حوضهٔ آبریز مورد مطالعه، مدل SWAT نسبت به ۱۷ پارامتر مؤثر بر رواناب حساسیت بیشتری دارد. همچنین پارامترهای انتخاب شده تأیید کننده نتایج پژوهش‌های پیشین انجام گرفته در منطقه است (۱۷). در جدول ۲ نتایج حاصل از تحلیل حساسیت پارامترها آورده شده است.

از پارامترهای حساس انتخاب شده در مرحله آنالیز حساسیت جهت واسنجی مدل استفاده شد. در مرحله بعد پارامترهای حساس به نرم‌افزار SWAT-CUP وارد گردید. سپس این پارامترها با الگوریتم SUFI2، ۱۰۰۰ بار مورد تکرار قرار گرفتند و در نهایت مقدار بهینه برای هر پارامتر مشخص شد. در جدول ۳ مقادیر بهینه و حدود مقادیر پارامترهای منتخب در دوره واسنجی (۲۰۰۰-۲۰۰۶) ارائه شده است.

نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT (داده‌های مشاهده ای، شبیه‌سازی شده و باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد) به صورت نمونه برای دو ایستگاه هیدرومتری پل زمان‌خان و لنج جهت بررسی کارایی مدل در شبیه‌سازی رواناب در حوضه آبریز زاینده‌رود به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان‌داده شده است. همچنین در جدول ۴ مقادیر بدست آمده از شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی رواناب برای تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود ضریب ناش- ساتکلیف و ضریب تعیین در هر ۶ ایستگاه هیدرومتری در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب بزرگتر از ۰/۵۶ و ۰/۶۹ می‌باشد که بیانگر آن است که مدل در شبیه-سازی رواناب توانایی قابل‌قبولی داشته است.

جدول ۲- نتایج حاصل از تحلیل حساسیت پارامترها برای حوضه زاینده‌رود

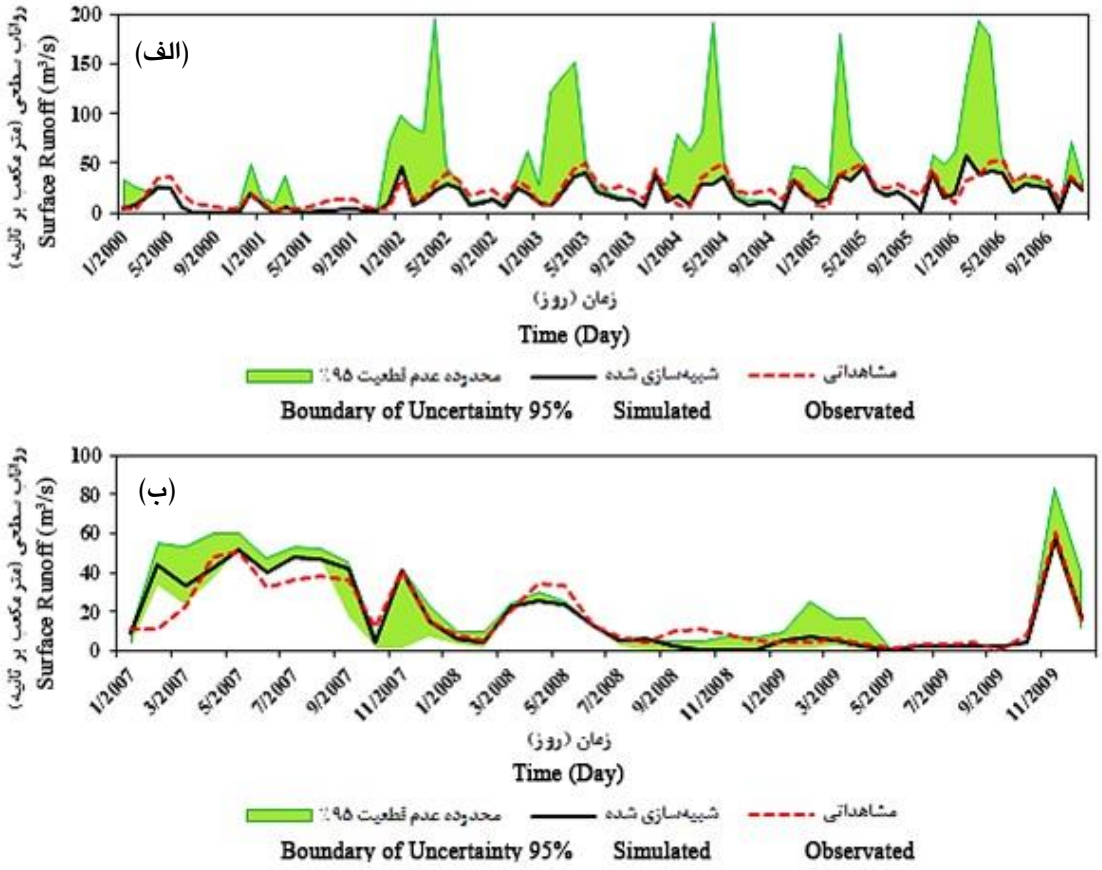
Table 2- Results of sensitivity analysis of parameters for the Zayandeh-Rud River basin

پارامتر حساس Sensitive parameters	رتبه Rank	آماره p p-value	آماره t t-state	پارامترحساس Sensitive parameters	رتبه Rank	آماره p p-value	آماره t t-state
GW_DELAY	13	0.2225	2.74	CH_K2	2	0.0435	-14.61
GW_REVAP	1	0.0117	24.35	CH_N2	17	0.6467	0.62
SFTMP	16	0.3373	-1.71	CN2	12	0.1941	-3.18
SMTMP	6	0.1419	-4.41	SOL_K	4	0.0671	-9.46
SMFMX	11	0.1630	3.82	SOL_BD	3	0.0572	-11.11
SMFMN	5	0.1100	5.73	SOL_AWC	7	0.1505	4.15
TIMP	14	0.2300	2.65	EPCO	9	0.1595	3.91
ALPHA_BF	10	0.1619	-3.85	ESCO	15	0.2831	-2.1
				RCHRG_DP	8	0.1549	4.03

جدول ۳- مقادیر بهینه و حد بالا و پایین پارامترهای منتخب در دوره واسنجی (۲۰۰۰-۲۰۰۶)

Table 3- Optimal and upper and lower limit of selected parameters during calibration period (2000-2006)

نام پارامتر Parameter name	شرح پارامتر Description	نوع تغییرات پارامتر* Method of changing parameter value	واحد Unit	حدود پارامتر Range of parameter		مقدار بهینه Optimum value
				بالا Maximum	پایین Minimum	
CH_K2	هدایت هیدرولوژیکی مؤثر در کانال اصلی	v	mm/hr	114	101.5	103.47
CH_N2	ضریب مانینگ برای کانال اصلی	r	-	0.13	0.102	0.11
CN2	شماره منحنی نفوذ (SCS) برای شرایط اولیه رطوبت	r	-	0.281	0.197	0.24
SOL_K	هدایت هیدرولیکی اشباع	r	mm/hr	-0.32	-0.15	-0.31
SOL_BD	وزن مخصوص ظاهری خاک	r	g/cm^3	-0.167	-0.095	-0.11
SOL_AWC	ظرفیت ذخیره آب موجود در خاک	r	mm H_2O/mm soil	0.28	0.21	0.27
EPCO	ضریب جبران کننده جذب رو به بالای آب توسط گیاه	v	-	0.41	0.29	0.41
ESCO	ضریب جبران کننده تبخیر از سطح خاک	v	-	0.501	0.41	0.46
RCHRG_DP	کنترل نفوذ به آبخوان عمیق	v	-	0.32	0.229	0.27
GW_DELAY	زمان تأخیر برای تغذیه آبخوان	v	days	159	132.7	135.52
GW_REVAP	ضریب تبخیر مجدد در آب زیرزمینی	v	-	0.115	0.085	0.11
SFTMP	دمای بارش برف	v	° C	-1.81	-1	-1.69
SMTMP	دمای آستانه برای ذوب برف	v	° C	-1.92	-0.95	-1.28
SMFMX	فاکتور بیشینه ذوب برف در تابستان	v	mm/C.day	11.36	9.72	10.67
SMFMN	فاکتور کمینه ذوب برف در زمستان	v	mm/C.day	8.95	7.5	7.92
TIMP	فاکتور تؤخیر دمای فشرده‌سازی برف	v	-	0.7	0.5	0.65
ALPHA_BF	ثابت پسروی جریان پایه	v	Day	0.08	0	0.035



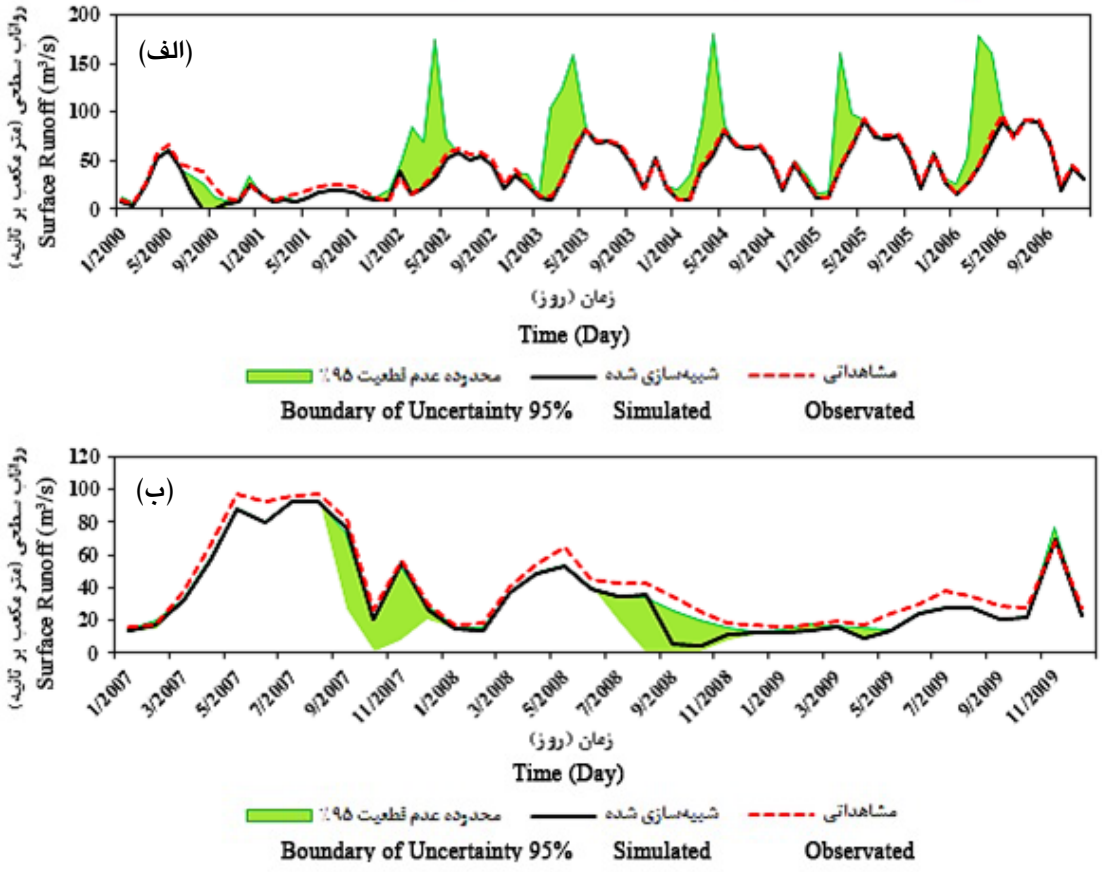
شکل ٤- نتایج واسنجی (الف) و صحت سنجی (ب) مدل SWAT با استفاده از الگوریتم SUFI-2 برای شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه هیدرومتری پل زمان‌خان

Figure 4- Validation results (a) and validation results (b) of the SWAT model using the SUFI-2 algorithm for the runoff simulation at Polzamankhan's hydrometric station

جدول ٤- مقایسه آماری دبی روزانه شبیه‌سازی و مشاهدهای در دوره واسنجی

Table 4- Statistical comparison of daily discharge simulation and observation in the calibration period

ایستگاه هیدرومتری Hydrometric station	طول دوره آماری Statistical period		آماره نش ساتکلیف NS		ضریب تعیین R^2	
	صحت‌سنجی Validation	واسنجی Calibration	صحت‌سنجی Validation	واسنجی Calibration	صحت‌سنجی Validation	واسنجی Calibration
سد تنظیمی	36	84	0.97	0.97	0.97	0.98
پل زمان‌خان	36	84	0.88	0.93	0.95	0.95
پل کله	36	84	0.90	0.89	0.95	0.95
دیزیچه	36	84	0.83	0.56	0.85	0.70
لنج	36	84	0.77	0.63	0.82	0.78
موسیان	36	84	0.69	0.68	0.83	0.79

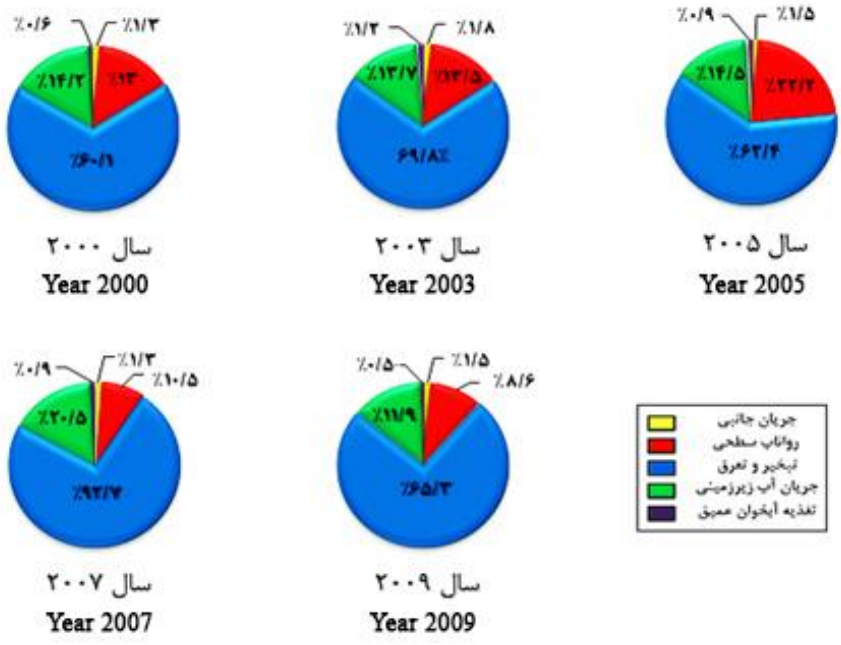


شکل ۵- نتایج واسنجی (الف) و صحت سنجی (ب) مدل SWAT با استفاده از الگوریتم SUFI-2 برای شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه هیدرومتری لنج

Figure 5- Validation results (a) and validation results (b) of the SWAT model using the SUFI-2 algorithm for the runoff simulation at Lenj's hydrometric station

سهم مؤلفه‌های بیلان آب از بارش سالانه در حوضه آبریز زاینده‌رود

پس از واسنجی مدل و اطمینان از کارایی مطلوب مدل در شبیه سازی فرآیندهای هیدرولوژیک برای منطقه، مدل واسنجی شده برای دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ به صورت ماهانه اجرا شد. سهم مؤلفه‌های تشکیل دهنده بیلان شامل تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، جریان جانبی، جریان آب زیرزمینی و تغذیه آبخوان عمیق از بارش سالانه حوضه محاسبه گردید. در شکل ۶ سهم هر یک از اجزای بیلان آب از بارش سالانه در حوضه آبریز زاینده‌رود برای سال‌های منتخب طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ ارائه شده است. حجم آب قابل استحصال از مرلفه‌های جریان نشان می‌دهد که بیش‌ترین سهم بیلان آب مربوط به تبخیر و تعرق واقعی می‌باشد که محدوده تغییرات آن بنا به نوع بارش در منطقه مورد تحقیق از ۶۰/۱٪ (سال ۲۰۰۰) تا ۹۲/۷٪ (سال ۲۰۰۷) متغیر می‌باشد. پس از تبخیر و تعرق، رواناب سطحی با میزان تغییرات ۲۲/۲٪ (سال ۲۰۰۵) تا ۸/۶ ٪ (سال ۲۰۰۹) و جریان آب زیرزمینی با میزان تغییرات ۱۴/۲٪ (سال ۲۰۰۰) تا ۲۰/۵٪ (سال ۲۰۰۷) از نوسانات نسبتا بالا و سهم زیادی در بیلان حوضه برخوردار بودند. این نتایج نشان می‌دهد جریانی جانبی با دامنه تغییرات ۱/۳٪ تا ۱/۹٪ تغییر قابل توجهی در این سال‌ها نداشته است. همچنین تغذیه آبخوان عمیق با دامنه تغییرات ۱/۲٪ تا ۰/۵٪ به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۹ کمترین سهم را به خود اختصاص داده است.

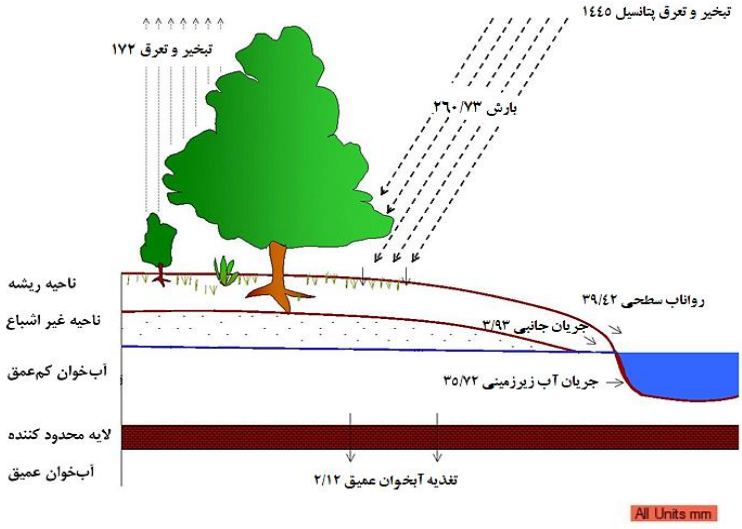


شکل ٦- سهم هر یک از پارامترهای بیلان آب از بارش سالانه در حوضه آبریز زاینده‌رود برای سال‌های منتخب طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹

Figure 6- Contribution of each water balance parameter from annual precipitation in the Zayandeh-Rud River Basin for years 2000-2009

با توجه به قرار داشتن در ناحیه نیمه‌خشک و عرض جغرافیایی میانه، منطقه مورد مطالعه از میزان تبخیر و تعرق پتانسیل بالایی برخوردار است. به طوری که تبخیر و تعرق (۶۵/۹۸ درصد) بیش‌ترین سهم تلفات بارش سالانه در منطقه را تشکیل می‌دهند. همچنین پس از تبخیر و تعرق، به‌ترتیب رواناب سطحی (۱۵ درصد)، جریان آب زیرزمینی (۱۳/۷ درصد)، جریان جانبی (۱/۵ درصد) و تغذیه آبخوان عمیق (۰/۸ درصد) سایر سهم باقی‌مانده از بارش را تشکیل می‌دهند.

سایر مطالعات انجام شده از جمله ضیایی در محاسبه بیلان کمی منابع آب در حوضه آبریز زاینده‌رود با استفاده از تصاویر سنجش از دور و همچنین فرامرزی و بسالت‌پور در ارتباط با کاربرد مدل نیمه توزیعی SWAT در مدل‌سازی هیدرولوژیک حوضه آبریز زاینده‌رود تأیید کننده توانایی این مدل در شبیه‌سازی و محاسبه بیلان کمی منابع آب حوضه آبریز می‌باشند که نتایج نسبتا مشابهی با این پژوهش داشته‌اند.

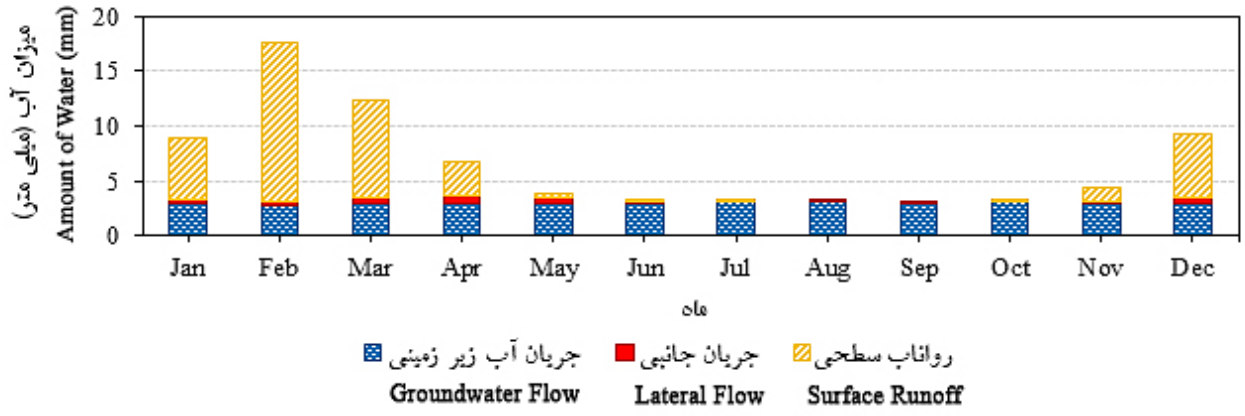


شکل ۷- میانگین سالانه مؤلفه‌های بیلان آب محاسبه شده توسط مدل SWAT برای دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ در حوضه آبریز زاینده‌رود

Figure 7- Average annual water balance components for the period 2000-2009 in the Zayandeh-Rud River Basin

مطالعات ضیایی (۱۳۹۵) نشان داد که میانگین رواناب، تبخیر و تعرق و تغذیه به ترتیب ۲۶/۹، ۷۱/۲ و ۱/۴۱درصد نسبت به بارش ورودی به حوضه آبریز برای سال ۲۰۱۳ است (۳). همچنین فرامرزی و بسالت‌پور (۲۰۱۵) گزارش داده‌اند که میانگین بارش برف، ذوب برف، رواناب سطحی، تغذیه آب زیر زمینی و تبخیر و تعرق واقعی ۱۹/۵ و ۱۴/۶ و ۲۵/۶ و ۶/۰۹ و ۶۳/۴ درصد برای دوره زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۹می‌باشد (۹). میانگین سالانه مؤلفه‌های بیلان آب محاسبه شده توسط مدل SWAT برای دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ در حوضه آبریز زاینده‌رود در شکل ۷ قابل مشاهده است.

مقدار آب ورودی به رودخانه (از منابع مختلف) در زمستان و اوایل بهار بیشترین مقدار و در اواخر تابستان به کمترین میزان می‌رسد. در تمامی ماه‌های سال، آب زیرزمینی به صورت جریان پایه بخش ثابتی از آب رودخانه را تأمین می‌کند. همچنین برخلاف رواناب سطحی که از اواسط پاییز تا اوایل بهار بیش‌ترین سهم از جریان رودخانه را تأمین می‌کند، جریان جانبی در بیشتر ماه‌های سال سهم بسیار کمی از جریان رودخانه را شامل می‌شود (شکل ۸).



شکل ۸- سهم رواناب سطحی، جریان آب زیرزمینی، جریان جانبی در تامین جریان ماهانه رودخانه زاینده رود

Figure 8- Contribution of surface runoff, groundwater flow, lateral flow in the supply of monthly flow of Zayandeh-Rud River Basin

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، بخش هیدرولوژیک مدل SWAT در حوضه آبریز زاینده‌رود مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج صحت‌سنجی مدل نشان داد این مدل در برآورد بیلان آب در حوضه آبریز زاینده‌رود از کارایی مناسبی برخوردار است و می‌تواند در حوضه‌های آبریز مشابه و تحلیل سناریوهای مختلف مورد استفاده واقع شود. با توجه نتایج بدست آمده از اجرای مدل به‌صورت ماهانه طی دوره شبیه‌سازی (۲۰۰۹– ۲۰۰۰)، از کل بارش سالانه ورودی به حوضه به‌ترتیب ۶۵/۹۸ درصد به صورت تبخیر و تعرق ، ۱۵ درصد به صورت رواناب سطحی، ۱۳/۷ درصد به صورت جریان آب زیرزمینی، ۱/۵ درصد به صورت جریان جانبی و ۰/۸ درصد به صورت تغذیه آبخوان عمیق از حوضه خارج می‌گردد. همچنین این نتایج نشان دهنده هدر رفت ذخایر آبی موجود در خاک و منابع زیرزمینی حوضه از طریق تبخیر و تعرق است که بیش‌ترین سهم تلفات بارش سالانه در منطقه را تشکیل می‌دهد. از این رو، اقدامات جدی در راستای جلوگیری از هدر رفت آب از طریق تبخیر و تعرق در منطقه ضروری به‌نظر می‌رسد. از نتایج این پژوهش می‌توان برای پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم و اقدامات مدیریتی قابل اجرا در منطقه که به‌صورت سناریوهایی به مدل ارائه می‌شود، استفاده کرد.

منابع

1- Abbaspour K.C. 2009. SWAT-CUP, SWAT Calibration and uncertainty programs, version 2 (user manual), EAWAG, 105p.

2- Adeogun A.G., Sule B.F., and Salami A.W. 2014. Validation of SWAT model for prediction of water yield and water balance: case study of upstream catchment of Jebba dam in Nigeria. International Journal Computer Math. Science, 8(2): 264-270.

3- Faramarzi M., Abbaspour K.C., Schulin R., and Yang H. 2009. Modelling blue and green water resources

availability in Iran. Hydrology Procedings, 23(3): 486-501.
4- Faramarzi M., and Besalatpour A.A. 2015. Hydrological modelling of Zayandeh Rud river basin using SWAT model. Isfahan Regional Water Organization, Final Report.
5- George S., and Sathian K.K. 2016. Assessment of water balance of a watershed using SWAT model for water resources management. International Journal of Engineering Science and Technology, 5(4): 177–184.
6- Ghoraba S.M. 2015. Hydrological modeling of the Simly Dam watershed (Pakistan) using GIS and SWAT model. Alexandria Engineering Journal, 54(3): 583–594.
7- Gohari A., Eslamian S., Mirchi A., Abedi-Koupaei J., Massah Bavani A., and Madani K. 2013. Water transfer as a solution to water shortage: a fix that can backfire. Journal Hydrology, 491(1): 23-39.
8- Golshan M., Kavian A., Rouhani H., and Esmali Ouri A. 2015. Effect of Scale on SWAT Model Performance in Simulation of Runoff (Case Study: Haraz Catchment in Mazandaran Province). Iranian Journal of Soil and Water Research, 46(2): 293-303. (In Persian)
9- Hosseini M., Ghafouri M., Makarian Z., and Tabatabaei M. R. 2016. Estimate of the water balance in the basins reaching the Persian Gulf using the Semi-distributed SWAT Model. Journal of Soil and Water Sciences, 78(1): 183-194. (In Persian)
10- Kouhestani S. 2016. Evaluation of effects of climate change on the availability of blue and green water resources in Zayandeh-rud Basin. Ph.D. thesis Water Resources Engineering. College of Agriculture, Isfahan University of Technology. (In Persian)
11- Madani K., and Marino M.A. 2009. Expert knowledge based modeling for integrated water resources planning and management in the Zayandehrud River Basin. Water Resource Management, 23(11): 2163-2187.
12- Morgan R.P.C., and Nearing M.A. 2011. Handbook of erosion modelling. 1th, John Wiley & Sons, Ltd., Atrium.
13- Nash J.E., and Sutcliffe J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10(3): 282-290.
14- Neitsch S., Arnold J., Kiniry J., and Williams J. 2011. Soil and water assessment tool: theoretical documentation, version 2009, Texas Water Resource Institute, USA.
15- Safavi H.R., Golmohammadi M.H., and Sandoval-Solis S. 2015. System dynamics analysis for management Iran's Zayandeh-Rud River Basin. Journal of Hydrology, 528: 773-789.
16- Sathian K.K., and Shyamala P. 2009. Application of GIS Integrated SWAT Model for Basin Level Water Balance. Indian Journal of Soil Conservation, 37: 100-105.
17- Shafei M., Ansari H., Davari K., and Ghahreman B. 2013. Calibration and uncertainty analysis of a semi-distributed model in a semi-arid region. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources. Water and Soil Science. 17(64): 137-148. (In Persian)
18- Zareian M. J., Eslamian S., and Safavi H.R. 2014. A modified regionalization weighting approach for climate change impact assessment at watershed scale. Theoritical and Applied Climatology, 22(3-4): 497-516.
19- Ziaei H.R. 2016. Numerical analysis of water balance components of Zayandeh-Rud basin using remote sensing. MS.c Thesis in Water Resources Engineering. College of Agriculture, Isfahan University of Technology. (In Persian)

Journal of Water and Soil
Vol. 32, No. 5, Nov.-Des. 2018, p. 849-863

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۲، شماره ۵، آذر – دی ۱۳۹۷، ص. ۸۶۳-۸۴۹

Assessment of SWAT Hydrological Model in Catchments' Water Balance Simulation Located in Semi-Arid Regions (Case Study: Zayandeh-Rud River Basin)

M. A. Amini[1]*- Gh. Torkan[2]- S. Eslamian[3]- M.J. Zareian[4]- A.A. Besalatpour[5]

Received: 04-12-2017
Accepted: 29-07-2018

Introduction: Understanding the concept of water balance is one of the most important prerequisites for sustainable management of water resources in the watersheds. Therefore, the components of water resources in a catchment system should be compared at different time periods, and also the effect of each of them should be identified on varied hydraulic components of the hydrological systems. The SWAT model is an example of a physically based hydrologic model which can be used for large-scale simulating and monitoring of water cycle processes based on the characteristics of the catchment area and its climatic conditions. The main object of this study is the hydrologic simulation and water balance estimation for the period 2000-2009 in the Zayandeh-Rud River Basin.

Materials and Methods: The Zayandeh-Rud River Basin is located in the arid and semi-arid central region of Iran. This area is very variable in terms of rainfall. As well as the state of water resources and water consumption is very complicated in this catchment. In the present study, the soil and water assessment tool (SWAT) used to simulate water balance in the Zayandeh-Rud River Basin. The input required data included digital elevation model, land use map, soil texture map and meteorological information including daily rainfall data and minimum and maximum temperature data were introduced to the model and the model was implemented with these data. The sensitivity of the flow-effective parameters was determined using the p-value and t-state criteria by the SUFI2 algorithm in the SWAT-CUP program. The model was calibrated monthly and validated with the selected parameters in the sensitivity analysis using the Nash-Sutcliff criteria and the coefficient of determination by the application of the data of six stations including. Calibration of the model was conducted for 2000-2006 and validation of the model for the years 2007-2009.

Results and Discussion: The results of sensitivity analysis showed that considering the characteristics of the study area, the SWAT model is more sensitive to the 17 effective parameters on runoff. The selected parameters also confirm the results of previous research carried out in the region. The sensitive parameters selected in the sensitivity analysis step were used to calibrate the model. In the next step, the parameters of SWAT-CUP software were entered. After that, these parameters were repeated 1000 times with the SUFI2 algorithm, and the optimal value for each parameter was determined. The Nash-Sutcliff coefficient and the coefficient of determination in the six hydrometric stations are greater than 0.56 and 0.69 in calibration and verification periods respectively, which indicates that the model has a satisfactory ability to run in runoff simulation. The contribution of the components of the water balance including evapotranspiration, surface runoff, lateral flow, groundwater flow, and deep aquifer recharge was calculated from annual basin precipitation. The amount of extracted water from the hydrological components indicated that the largest share of the water balance was related to actual evapotranspiration, the range of variations in the type of precipitation in the study area ranged from 60.1% (2000) to 92.7 % (2007). After evapotranspiration, surface runoff with a change of 22.2% (2005) to 8.6% (2009) and groundwater flow with a change of 14.2% (2000) to 20.5% (the year 2007) had relatively high fluctuations and a large share in the basin balance. These results indicate that the lateral flow with a range of 3.1 to 1.9% had no significant change in these years. Also, the deep aquifer recharge with the range of 1.2 to1.5% was the lowest in 2003 and 2009, respectively.

Conclusion: The results showed that the calibrated model for the Zayandeh-Rud River Basin had a desirable performance for both calibration and validation periods. Therefore, the SWAT model has acceptable

1 and 2- Ph.D. Students, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
(*- Corresponding Author Email: Aminiamin2016@gmail.com)
3- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
4- Ph.D. of Departement of Water Resources Research, Water Research Institute (WRI), Ministry of Energy, Tehran, Iran
5- Ph.D. of Inter 3 GmbH- Institut für Ressourcenmanagement, Berlin, Germany

performance for simulating the water balance of the area. In addition, the results of this study showed that 65.98% of the total annual precipitation in the basin is in form of evapotranspiration, which compares to the other water balance components has the highest part. As well as surface runoff with 15%, groundwater flow with 13.7%, lateral flow with 1.5%, and deep aquifer recharge with 0.8% have other parts of the water balance components in Zayandeh-Rud River Basin. The results also indicate that the highest water losses in the soil and groundwater resources of the basin are due to evapotranspiration. Therefore, serious measures to prevent the loss of water through evapotranspiration in the region to be necessary. The results of this research can be used to predict the effects of climate change and the applicable management practices in the region, which are presented in scenarios to the model.

Keywords: Calibration, Sensitivity analysis, SUFI2 Algorithm, SWAT-CUP, Validation