

ارزیابی کارایی مدل‌های بارش - رواناب Sacramento, AWBM و تانک در شبیه‌سازی رواناب رودخانه ارازکوسه حوضه آبخیز گرگان رود استان گلستان

حسین سلمانی^۱، عبدالرضا بهره‌مند^{۲*}، کاظم صابرچناری^۱، محمد رستمی خلج^۳

۱. دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲. دانشیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳. دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱۲/۱۱)

چکیده

با توجه به دامنه وسیع مدل‌های هیدرولوژیکی موجود، بررسی کارایی مدل‌ها برای اهداف مختلف مدیریتی ضروری است. مدل‌هایی که در عین سادگی ساختار و با حداقل ورودی، نتایج قابل قبولی ارائه دهند، می‌توانند به عنوان ابزاری کارآمد در خدمت مدیر حوضه آبخیز باشند؛ از این رو هدف از این تحقیق، ارزیابی عملکرد نسبی مدل‌های بارش - رواناب یکپارچه و مفهومی Sacramento, AWBM و تانک در شبیه‌سازی رواناب روزانه ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه حوضه آبخیز گرگان رود استان گلستان است. در تمامی مدل‌ها، شبیه‌سازی به صورت خودکار و در دوره زمانی واسنجی پنج‌ساله (۱۹۸۸-۱۹۸۴) و اعتبارسنجی چهارساله (۱۹۹۵-۱۹۹۲) صورت گرفت. ارزیابی دقت مدل‌ها با شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب کارایی نش - ساتکلیف (E_{NS}) نشان از موفقیت آمیز بودن تمامی مدل‌ها در شبیه‌سازی رواناب روزانه دارد. نتایج آماری و نموداری نشان داد که مدل Sacramento با شاخص $E_{NS} = 0.677$ ، $RMSE = 4.056$ و $R^2 = 0.823$ در طی دوره واسنجی و $E_{NS} = 0.669$ ، $RMSE = 7.905$ و $R^2 = 0.719$ در طی دوره اعتبارسنجی دارای بهترین کارایی در بین سایر مدل‌هاست. در تمام مدل‌ها، شبیه‌سازی در طی دوره واسنجی نسبت به دوره اعتبارسنجی از دقت بیشتری برخوردار است. همچنین مدل‌ها مقادیر کمینه و متوسط جریان را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کرده‌اند و با وجود شبیه‌سازی خوب مقادیر اوج جریان، نتایج نشان می‌دهد مدل‌های مورد نظر نمی‌توانند تمام پیک‌ها را به خوبی شبیه‌سازی کنند. از آنجا که این مدل‌ها به داده‌های ورودی زیادی نیاز ندارند، می‌توان از این مدل‌ها با توجه به نیاز در ارتقای سطح مدیریت منابع آب استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: ارازکوسه، بارش - رواناب، شبیه‌سازی، گرگان رود، مدل.

مقدمه

درک و پیش بینی فرایندهای تولید و انتقال جریان به خروجی حوضه یکی از اساسی ترین مباحث در علم هیدرولوژی محسوب می شود [۵]. دلایل متعددی برای پاسخ به این پرسش وجود دارد که چرا باید فرایندهای هیدرولوژیکی بارش- رواناب را مدلسازی کرد؟ پاسخ اصلی این پرسش، محدودیت روش های اندازه گیری در هیدرولوژی است. در حقیقت فرد قادر نیست هر چیزی در مورد سیستم های هیدرولوژیکی را اندازه گیری کند زیرا فقط تعداد محدودی از روش های اندازه گیری و همچنین دامنه محدودی از اعداد در اختیار اوست. بنابراین به روشی احتیاج است تا از طریق آن بتوان آمار موجود را برای حوضه های بدون آمار یا مکان هایی که اندازه گیری آنها امکان پذیر نیست تعمیم داد و به تغییرات هیدرولوژیکی آینده دست یافت و این روش مؤثری برای تولید علم است [۱۱]. روش های غیرمستقیم متعددی برای شبیه سازی فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه های آبخیز با پیشرفت در علوم زمین ارائه شده است. یکی از این روش ها استفاده از مدل های رایانه ای است [۳، ۲]. مدل های هیدرولوژیکی نمایش ساده شده ای از سیستم های واقعی اند که به مطالعه کارکرد حوضه در واکنش به ورودی های گوناگون می پردازند و به فهم بهتر فرایندهای هیدرولوژیکی کمک می کنند؛ و امکان شبیه سازی فرایندهای بارش- رواناب حوضه را با حداقل زمان و هزینه فراهم می سازند [۲۲]. مدل های هیدرولوژی برای مسائلی همچون توسعه و مدیریت حوضه و ارزیابی منابع آب اهمیت خاصی دارند. بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی و تغییر کاربری اراضی روی منابع آب با استفاده از مدل های حوضه ای امکان پذیر می شود. بنابراین توسعه و تکمیل مدل های هیدرولوژی برای فهم تأثیرات متقابل بین اقلیم و سیستم هیدرولوژی و برای بررسی دامنه وسیعی از مشکلات زیست محیطی و منابع آبی ضروری به نظر می رسد [۱۸]. با توجه به تنوع مدل های بارش رواناب در دسترس، انتخاب مدل بارش رواناب مناسب برای حوضه از نظر بهره وری برنامه ریزی و مدیریت منابع آب مهم است. انتخاب مدل به هدف از مدلسازی، قابلیت و محدودیت مدل های هیدرولوژیکی حوضه و اطلاعات قابل دسترس بستگی دارد [۳]؛ از این رو انتخاب مدلی که بتواند در عین سادگی ساختار و با

استفاده از حداقل اطلاعات ورودی و با کمترین زمان و هزینه ممکن نتایج قابل قبولی را در حوضه های آبخیزی بدون ایستگاه ارائه کند می تواند به عنوان ابزاری کارآمد در خدمت مدیر حوضه آبخیز باشد [۶، ۴]. بسته نرم افزاری RRL^۱ شامل مجموعه ای از مدل های مدل یکپارچه و مفهومی مانند AWBM^۲، Sacramento، SimHyd، SMAR^۳ و تانک است که تنها از دو ورودی برای شبیه سازی رواناب خروجی حوضه استفاده می کند. از این رو در این تحقیق این روش به عنوان ابزار پیش بینی جریان هیدرولوژی ارزیابی شده است. از جمله مطالعات صورت گرفته در این زمینه می توان به مطالعات شریفی و همکاران [۶]، زرین و همکاران [۴]، شریفی و بوید [۲۱]، سنایی نیا [۱۹] و دیویا و آشو [۱۴] در استفاده از مدل AWBM؛ مطالعات لوری [۱۶]، وراگ و همکاران [۲۵] و واز و همکاران [۲۴] در زمینه استفاده از مدل Sacramento و مطالعات هاشمی و مهرابی [۹]، یو و هاشینو [۲۸] و چن و آدامز [۱۳] در زمینه استفاده از مدل تانک اشاره کرد. هدف از این تحقیق شبیه سازی رواناب روزانه ایستگاه هیدرومتری آراز کوسه حوضه آبخیز گرگان رود استان گلستان و بهینه سازی اتوماتیک پارامترهای مؤثر بر بارش- رواناب در مدل های یکپارچه و مفهومی AWBM، Sacramento و تانک در بسته نرم افزاری RRL است. به طور کلی کاربرد این مدل ها درک بهتری از فرایند پیچیده حوضه به منظور ارتقای سطح مدیریت منابع آب فراهم می کنند.

مواد و روش ها

معرفی مدل AWBM

مدل AWBM در سال ۱۹۹۳ توسط بوتن توسعه یافت که یکی از مدل های بارش- روانابی است و سادگی و دقت از ویژگی های آن است و قادر به شبیه سازی رواناب از بارش، دبی و تبخیر و تعرق روزانه یا ساعتی است [۶، ۴]. مدل AWBM براساس نظریه جریان از سطوح جزئی اشباع که مشابه نظریه جریان سطحی اشباع است، توسعه داده شده است. در مدل با در نظر گرفتن سه سطح ذخیره (C1، C2

1. Rainfall-runoff library
2. Australian Water Balance Model
3. Soil Moisture Accounting And Routing Model

زهکش می‌شود، که در آن SS^3 رطوبت موجود در رواناب مخزن سطحی و KS^4 ثابت کسر رواناب سطحی برای گام زمانی استفاده شده است. شکل ۱ ساختار کلی مدل استفاده شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. همچنین پارامترهای بخش‌های مختلف مدل AWBM همراه با توصیف آنها در جدول ۲ ارائه شده است.

معرفی مدل Sacramento

مدل Sacramento مدل پیوسته مفهومی و غیرتوزیعی بارش رواناب است که برای پیش‌بینی سیلاب در ایالت متحده توسعه پیدا کرده است. این مدل یکی از مدل‌هایی است که برای تبدیل ورودی بارش به خروجی جریان آبراه‌های از بارندگی و تبخیر ثبت شده استفاده می‌کند. این مدل دارای شانزده پارامتر مختلف است که پنج پارامتر مشخص‌کننده اندازه رطوبت ذخیره شده در خاک، سه پارامتر محاسبه‌کننده میزان جریان جانبی، سه پارامتر محاسبه‌کننده میزان نفوذ آب از لایه‌های بالایی به لایه پایینی ذخیره، دو پارامتر محاسبه‌کننده رواناب مستقیم است و سه پارامتر تلفات سیستم را محاسبه می‌کنند (جدول ۳). مدل Sacramento از رطوبت خاک برای شبیه‌سازی بیلان آب در حوضه استفاده می‌کند. رطوبت خاک با افزایش بارندگی افزایش می‌یابد و توسط تبخیر و جریان آب به خارج از مخزن کاهش می‌یابد. اندازه و رطوبت نسبی مخزن عمق بارش جذب شده، تبخیر و تعرق واقعی و مقدار آب خارج شده از مخزن را تعیین می‌کند.

بارش مازاد بر مقدار جذب شده به رواناب تبدیل می‌شود. حرکت جانبی آب از ذخایر رطوبت خاک به رواناب تبدیل شده و وارد جریان آبراهه می‌شود. در مدل Sacramento پنج مخزن وجود دارد: منطقه بالایی کشش آب، منطقه بالایی آب آزاد، منطقه پایینی کشش آب، منطقه پایینی آب آزاد اولیه و منطقه پایینی آب آزاد اضافی. مخزن‌های کشش آب، حجم آبی را که در توده خاک توسط کشش سطحی نگه داشته می‌شود نشان می‌دهد. آب در این مخزن تنها می‌تواند از طریق تبخیر و

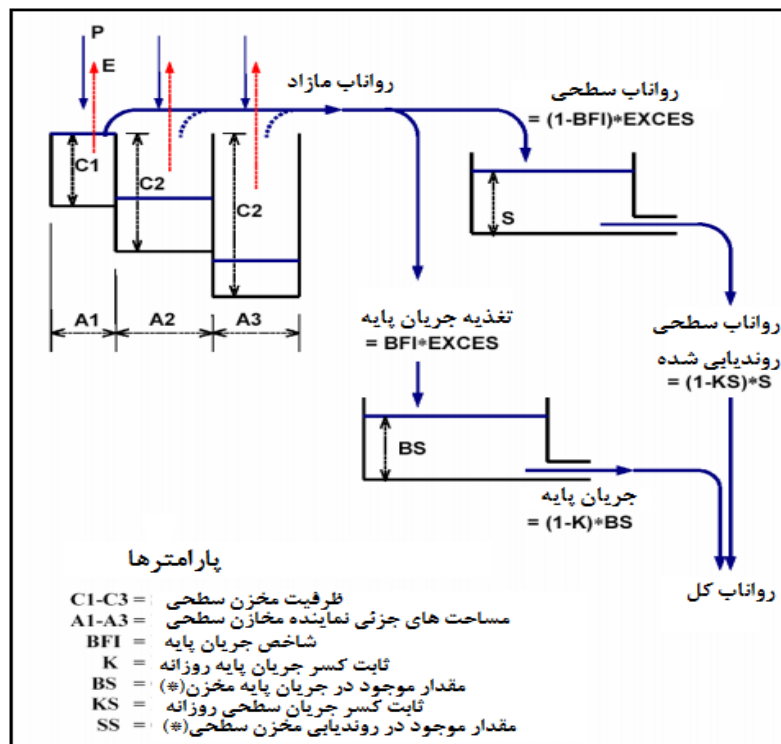
و (C3) با مساحت‌های (A1، A2 و A3) برای شبیه‌سازی ضریب رواناب استفاده می‌کند. به‌طور کلی بیلان آب در هر سطح ذخیره به‌طور مستقل محاسبه می‌شود. به این ترتیب در مدل AWBM بیلان آب در هر مساحت جزئی در هر مرحله زمانی محاسبه می‌شود. به‌نحوی که در هر مرحله بارش با توجه به ذخیره رطوبتی در هر یک از سطوح سه‌گانه ذخیره آب در خاک و با لحاظ مقدار تبخیر و تعرق بیلان آب با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$store_{n+1} = store_n + rain - evap \quad (n = 1 \text{ to } 3) \quad (1)$$

که در آن، اگر میزان رطوبت ذخیره منفی شود، صفر در نظر گرفته می‌شود که در این حالت تبخیر و تعرق از رطوبت موجود بیشتر است و اگر رطوبت ذخیره بیش از ظرفیت مخزن شود، رطوبت مازاد به رواناب تبدیل می‌شود و رطوبت ذخیره معادل ظرفیت مخزن باقی می‌ماند. در مدل، فرض بر این است که رواناب از دو منبع اصلی رواناب سطحی و آب پایه تأمین شود. پارامترهای مدل عبارتند از: ۱. شاخص جریان پایه؛ ۲. ثابت خشکیدگی روزانه جریان و ۳. ظرفیت ذخیره سطحی (C1، C2 و C3) و سطوح متناظر با این ظرفیت‌ها (A1، A2 و A3) برای محاسبه این پارامترها مدل از روش برازش چندمتغیره اتوماتیک استفاده می‌کند [۱۲]. این مدل سه پارامتری در رودخانه‌های فصلی که آب پایه ندارند، یک پارامتری می‌شود. زمانی که رواناب از هر مخزن خارج شود اگر جریان پایه در آبراهه وجود داشته باشد، قسمتی از رواناب به جریان پایه مخزن تبدیل می‌شود. کسری از رواناب که برای شارژ جریان پایه مخزن استفاده می‌شود، رواناب BFI^۱ را تشکیل می‌دهد و آب بیشتر از جریان پایه، رواناب سطحی را تشکیل می‌دهد. جریان پایه مخزن در نسبتی از $BS \times (1-K)$ زهکش می‌شود که در آن، BS^2 رطوبت موجود در جریان پایه مخزن و K ثابتی گام زمانی مورد استفاده برای جریان پایه است (روزانه یا ساعتی). رواناب سطحی می‌تواند از میان مخزن روندیابی شود، اگر برای شبیه‌سازی رواناب سطحی تأخیری رسیده به خروجی حوضه‌های متوسط و بزرگ مورد نیاز باشد. مخزن سطحی مانند روش جریان پایه مخزن عمل می‌کند و در نسبتی از $SS \times (1-S)$

3. Current Volume in Surface Routing Store
4. Daily surface Flow Recession Constant

1. Base flow Index
2. Current Volume in Baseflow Store



شکل ۱. ساختار مدل بارش رواناب AWBM

تبخیر همچنین می تواند مستقیماً از منطقه ای که توسط آبراهه ها، دریاچه ها و پوشش گیاهی پوشیده شده است رخ دهد. نفوذ به مخازن پایین تر فرایند مهم مدل Sacramento است. نیروی محرک برای نفوذ، رطوبت نسبی مخزن منطقه بالایی آب آزاد که توسط رطوبت نسبی مخازن منطقه پایین تر تعدیل شده، است. نفوذ در صورت افزایش ذخیره در مخزن منطقه بالایی آب آزاد یا کاهش ذخیره در مخازن منطقه پایینی، افزایش می یابد. این به ترتیب معادل افزایش تأمین و افزایش تقاضاست. در مقابل، نفوذ زمانی که مخازن پایین تر شروع به پر شدن می کند کاهش می یابد. حد پایین نفوذ زمانی رخ می دهد که مناطق پایین تر اشباع اند و توسط نرخی که در مخازن پایین تر زهکش می شود تعیین می شود (معادله ۲). حداکثر نرخ نفوذ زمانی رخ می دهد که مناطق پایین تر خشک هستند و P_{base} فاکتور مؤثر پارامتر مربوط به حداکثر نرخ نفوذ می شود (معادله ۳).

$$P_{base} = LZFSM \times LZSK + LZFPM \times LZPK \quad (2)$$

$$PERC_{MAX} = P_{base}(1 + ZPERC) \quad (3)$$

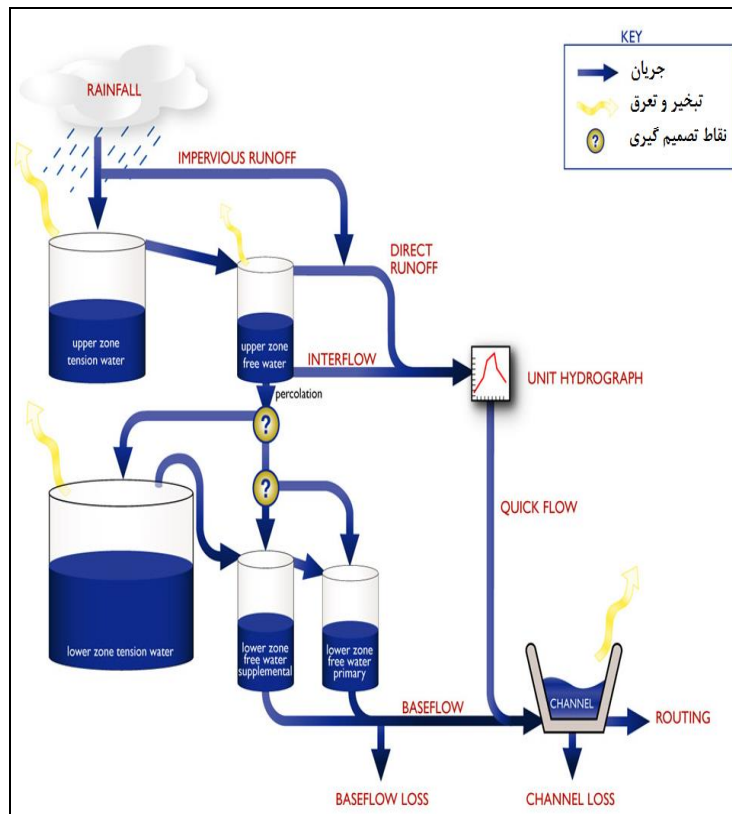
تعرق از دسترس خارج شود. در مخازن آب آزاد، آب از طریق خاک به طور عمودی به مخازن دیگر یا به صورت جانبی به عنوان جریان زیرقشری (منطقه بالایی) یا به عنوان جریان پایه (منطقه پایینی) حرکت می کند. حرکت آب از طریق مخازن توسط قوانینی تعیین می شود، که در ابتدا مخزن منطقه بالایی کشش آب، باران را دریافت می کند، و در زمانی که این مخزن پر آب شود به مخزن منطقه بالایی آب آزاد می رود. سپس این مخزن، همزمان آب را برای مخازن پایین تر فراهم می کند. زمانی که مخزن های کشش آب پر شد، آب وارد مخزن تنش آب می شود. جریان تولید شده توسط مدل Sacramento از سه جزء جریان ساخته شده است: جریان سطحی، جریان زیر قشری و جریان پایه. در این مدل تبخیر و تعرق تنها می تواند از مخزن تنش آب منطقه بالایی و پایینی، مخزن آب آزاد بالایی و مستقیماً از آبراهه اتفاق بیفتد. حد بالایی تبخیر نشان دهنده تقاضای تبخیری است، و توسط کاربر و داده های تشک اصلاح شده فراهم می شود. تبخیر ابتدا از منطقه بالایی کشش آب و پس از آن از منطقه بالایی آب آزاد و در نهایت از منطقه پایینی کشش آب اتفاق می افتد.

اگرچه تغييرات در نوع خاک موجب انحراف از شرايط متوسط مى‌شود بنا بر اين در مدل Sacramento كسرى از نفوذ براى مخزن آب آزاد پايين در دسترس است. شكل ۲ ساختار كللى مدل Sacramento و همچنين جدول ۳ پارامترهاى مختلف مدل را نشان مى‌دهد.

نفوذ واقعى توسط اشباع نسبي مناطق تحتانى و فوقانى تعديل مى‌شود، كه نسبتى از ذخيره واقعى به حداكثر ذخيره در اين مخزن براى برآورد نفوذ (معادله ۴) است.

$$Perc = Pbase \left[1 + Zperc \times [1 - LZ_{rs}]^{Re_{xp}} \right] \times UZ_{rs} \quad (4)$$

به‌طور معمول مخزن تنش منطقه پايينى قبل از اينكه آب به مخزن آب آزاد منطقه پايينى برود پر مى‌شود.

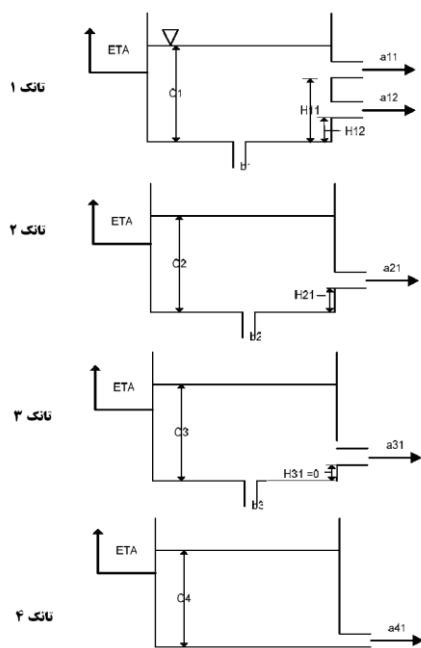


شكل ۲. ساختار مدل بارش رواناب Sacramento

شامل چهار مخزن است كه به‌طور عمودى در زير سطح زمين قرار مى‌گيرند. مدل از نوع ذخيره‌اى، براساس اين فرضيه است كه دبی و نفوذ، تابعى از مقدار آب ذخيره‌شده در زمين هستند. در هر مخزن روزه‌اى وجود دارد كه رواناب مازاد از هر مخزن از اين روزه خارج شده و مجموع اين رواناب‌هاى مازاد از هر مخزن رواناب خروجى را شبیه‌سازى مى‌كند. مدل تانك مدل خيلى ساده‌اى است كه شامل چهار مخزن، پنج خروجى كنارى، سه خروجى انتهائى و چهار نقطه ارتفاعى خروجى كنارى است. هر مخزن، معرف يك لايه از خاک است (شكل ۳). اولين مخزن نشان‌دهنده رواناب سطحى (a11 و a12 در تانك

معرفى مدل تانك

ساگووارا اولين بار در سال ۱۹۷۴ مدل تانك را به‌منظور شبیه‌سازى رواناب سيلاب با توجه به نقش هر يك از اجزای تشكيل‌دهنده آن شامل رواناب سريع (رواناب مستقيم)، زيرسطحى سريع، زيرسطحى تأخيري و رواناب زيرزمينى در قالب چهار مخزن سري با روزه‌هاى جانبى ارائه كرد [۲۳]. در اين مدل داده‌هاى ورودى شامل داده‌هاى بارش، رواناب و تبخير و روزه‌هاى روزانه است. مدل هيدرولوژيكي تانك مدل مفهومی يکپارچه‌اى است و پارامترهاى آن، معرف مقادير ميانگين براى كل حوضه هستند. مدل هيدرولوژيكي تانك به‌کاررفته در اين مطالعه،



شکل ۳. ساختار مدل هیدرولوژیکی تانک

واسنجی، اعتبارسنجی و ارزیابی کارایی مدل‌ها

برای شبیه‌سازی دبی با استفاده از مدل‌های موجود در این تحقیق اطلاعات اقلیمی در پایه زمانی روزانه مورد نیازند. این اطلاعات شامل بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل و دبی روزانه‌اند. این اطلاعات از ایستگاه‌های هواشناسی رامیان، نوده و آرازکوسه استخراج شد. به طوری که بعد از اخذ این آمار از سازمان تماب و آب منطقه‌ای کشور و بررسی صحت و دقت داده‌ها مقادیر متوسط بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه محاسبه شد. همچنین از داده‌های ایستگاه هیدرومتری آرازکوسه به عنوان ایستگاه مبنا برای مقایسه دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در طی هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی استفاده شد. شایان ذکر است که در تمامی مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش دوره تعادل‌سنجی (warming-up) و واسنجی دوساله (۱۹۸۲ تا ۱۹۸۳)، دوره واسنجی پنج‌ساله (۱۹۸۴ تا ۱۹۸۸)، دوره تعادل‌سنجی اعتبارسنجی سه‌ساله (۱۹۸۹ تا ۱۹۹۱) و دوره اعتبارسنجی چهارساله (۱۹۹۲ تا ۱۹۹۵) در نظر گرفته شده است. ویلیامز [۲۷] بیان کرد که بهتر است از چندین روش آماری به طور همزمان به جای یک روش آماری خاص برای ارزیابی دقت مدل شبیه‌سازی استفاده شود. در این راستا در این پژوهش از سه شاخص ارزیابی ضریب نش-

اول)، دومین مخزن نشان‌دهنده رواناب زیرسطحی، سومین مخزن نشان‌دهنده جریان زیر پایه (زیرین) و چهارمین مخزن نشان‌دهنده جریان پایه است. رواناب زمانی ایجاد می‌شود که سطح آب در هر مخزن بالاتر از ارتفاع خروجی کناری قرار گیرد (H_{11} , H_{12} , H_{21} , H_{31}). خروجی کناری مخزن دوم (a_{21}) رواناب میانی، a_{31} در مخزن سوم، رواناب زیر پایه (زیرین) و a_{41} در مخزن چهارم، جریان پایه هستند. خروجی انتهایی مخزن اول، به عنوان معادله نفوذ مدل فرض شده است. خروجی‌های انتهایی مخزن‌های دوم و سوم، به عنوان بخش تراوش در نظر گرفته شده است. در این مدل، پارامترهای مختلفی به منظور شبیه‌سازی بارش-رواناب در نظر گرفته شده‌اند که شامل ضرایب خروجی‌های کناری (a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{31} , a_{41})، ضرایب خروجی‌های انتهایی (b_1 , b_2 , b_3) و ارتفاع خروجی‌های کناری (H_{11} , H_{12}) هستند. این ضرایب نیز یکی از عوامل تعیین‌کننده در واسنجی مدل با توجه به داده‌های مشاهداتی هستند. مجموع دبی در مخزن و مقادیر تبخیر و تعرق در هر مخزن، به ترتیب با استفاده از روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند:

$$Q = a_{11} + a_{12} + a_{31} + a_{41} + \text{baseflow} \quad (5)$$

$$ETA = ETP \left(1 - \exp \left(-\alpha \sum_{x=1}^4 C_X \right) \right) \quad (6)$$

که در این رابطه، ETA میزان تبخیر و تعرق روزانه بر حسب میلی‌متر، ETP میزان تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه بر حسب میلی‌متر، α ضریب تبخیر و تعرق (۰، ۱) و C_X ارتفاع آب در هر مخزن است. نفوذ در هر مخزن نیز، به صورت رابطه ۷ تعریف می‌شود:

$$I_X = C_X B_X \quad (7)$$

که I_X میزان نفوذ بر حسب میلی‌متر، C_X سطح آب هر تانک و B_X ضریب نفوذ هر مخزن است [۳]. پارامترهای بخش‌های مختلف مدل تانک همراه با توصیف آنها در جدول ۴ ارائه شده است.

بى‌نهایت متغير است. هر چه مقدار اين شاخص کمتر باشد شبیه‌سازى بهتری صورت گرفته است و مقدار بهینه آن صفر است. مقدار اين شاخص به صورت زیر بيان می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2} \quad (10)$$

در معيارهاى ارزيابى بالا، $Q_{sim,i}$ جريان شبیه‌سازى شده، $Q_{obs,i}$ جريان مشاهده شده، میانگین $\bar{Q}_{sim,i}$ جريان شبیه‌سازى شده، $\bar{Q}_{obs,i}$ میانگین جريان مشاهده شده، i گام‌هاى زمانى و n تعداد کل گام‌هاى زمانى استفاده شده در طى دوره واسنجى و اعتبارسنجى است.

منطقه تحقیق

در اين مطالعه، ایستگاه هیدرومتری آرازکوسه با کد ۰۱۹-۱۲ براساس تقسیم‌بندی مرکز تحقیقات منابع آب (تماب) در خروجی حوضه‌ای به مساحت ۱۵۳۷ کیلومتر مربع به‌عنوان ایستگاه مبنا برای شبیه‌سازى بارش-رواناب انتخاب شد. حوضه تحقیق بخشی از حوضه اصلی و مهم حوضه گرگان‌رود استان گلستان است که در شمال شرقی کشور و در مختصات طول شرقی ۱۲° ۵۵' ۰۹" تا ۴۰° ۴۰' ۵۵" درجه و عرض شمالی ۱۵° ۴۵' ۳۶" تا ۳۷° ۱۵' ۱۰" درجه قرار گرفته است که بخش عمده‌ای از آن در استان گلستان واقع شده است (شکل ۴). این حوضه از جنوب به حوضه شاهرود و از شمال، شرق و غرب به بخشی از حوضه بزرگ گرگان‌رود محدود می‌شود و از لحاظ تقسیمات سیاسى در محدوده شهرستان‌هاى آزادشهر، مینودشت و گنبد واقع شده است. دامنه ارتفاعی این حوضه از ۲۸۸۹ متر در مناطق کوهستانی تا ۲۸ متر در مناطق دشتی متغیر است. عمده کاربری اراضی در حوضه مذکور کاربری‌هاى جنگل و مرتع-بوته‌زار به‌ترتیب با ۵۰/۱۴ و ۳۲/۷۲ درصد است. درجه حرارت متوسط سالانه و بارش متوسط سالانه حوضه در طى دوره واسنجى به‌ترتیب ۱۸/۹۶ درجه سانتی‌گراد و ۱/۸۳ میلی‌متر و در دوره اعتبارسنجى به‌ترتیب ۱۸/۵۴ درجه سانتی‌گراد و ۲/۰۹ میلی‌متر است که در ارتفاعات پایین بارش‌ها بیشتر به‌صورت باران و در ارتفاعات بالاتر به صورت برف است. همچنین محدوده تغییرات داده‌هاى مشاهداتی ورودی به مدل در طى هر دو دوره واسنجى و اعتبارسنجى در جدول ۱ ارائه شده است.

ساتکلیف (E_{NS})^۱، ضریب تبیین (R^2)^۲ و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)^۳ برای ارزيابى دقت مدل‌ها در طى دوره‌هاى واسنجى و صحت‌سنجى استفاده شده است. ضریب ناش- ساتکلیف یکی از رایج‌ترین شاخص‌هاى است که برای ارزيابى كارايى مدل‌هاى هیدرولوژیكى استفاده می‌شود [۱۷]. این شاخص حالتی استاندارد از تابع حداقل مربعات خطاهاست که نسبت واریانس باقی‌مانده به واریانس دبی‌ها را نشان می‌دهد (رابطه ۸):

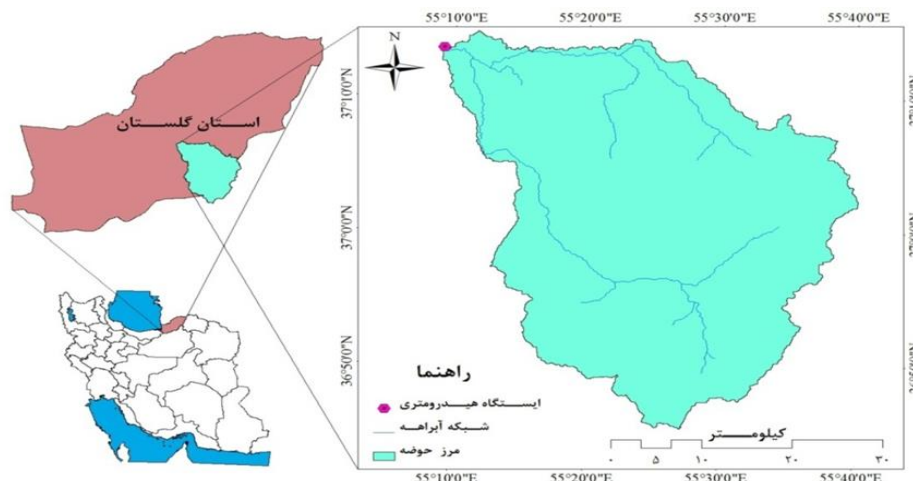
$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs,i})^2} \quad (8)$$

دامنه تغییرات E_{NS} از $-\infty$ تا +۱ بوده و مقدار بهینه این شاخص یک است. براساس پژوهش‌هاى مختلف صورت‌گرفته در این زمینه از جمله مطالعات گاسمن و همکاران [۱۵] اگر مقدار ضریب E_{NS} بالاتر از ۰/۵ باشد مدل شبیه‌سازى خوبی داشته است. ضریب تبیین (R^2) نیز یکی دیگر از شاخص‌هاى است که برای ارزيابى دقت مدل‌ها استفاده شده است که بیانگر همخوانی بین مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده است که می‌تواند با استفاده از روش تجزیه و برازش بررسی شود. ضریب تبیین بیان‌کننده بخشی از کل واریانس مقادیر مشاهده‌ای است که توسط مقادیر شبیه‌سازى شده توجیه می‌شود (رابطه ۹).

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim,i}) (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs,i}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim,i})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs,i})^2} \quad (9)$$

ضریب تبیین بین صفر تا یک تغییر می‌کند و مقدار بهینه آن یک است و این حالت مربوط به زمانى است که در آن مقادیر شبیه‌سازى شده دقیقاً مشابه مقادیر مشاهداتی باشد. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز یک تابع تناسب یا تابع هدف است و در واقع مجذور شاخص میانگین مربعات خطاست. این شاخص به‌عنوان معیاری از خطای مطلق بین دبی شبیه‌سازى و مشاهده‌ای است (رابطه ۱۰). مقدار این شاخص آماری بین صفر تا

1. Coefficient of Nash - Sutcliffe
2. Coefficient of determination
3. Mean Square error and Root Mean Square error



شکل ۴. موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز ارازکوسه در استان گلستان و کشور ایران

جدول ۱. مقادیر میانگین، انحراف معیار و حداقل و حداکثر داده‌های ورودی به مدل در منطقه تحقیق

اعتبارسنجی (سال آبی ۱۹۹۵-۱۹۹۲)			واسنجی (سال آبی ۱۹۸۸-۱۹۸۴)			داده ورودی
دبی (m^3/s)	تبخیر و تعرق (mm)	بارش (mm)	دبی (m^3/s)	تبخیر و تعرق (mm)	بارش (mm)	
۲۳۳۸	۱۰۴۹	۷۶۵/۱	۲۰۵۳/۶	۱۰۳۳/۴	۶۷۱/۶	متوسط سالانه
۱۳/۸۱	۲/۶۳	۵/۷۳	۸/۰۷	۲/۵	۵/۰۶	انحراف معیار سالانه
۳۲۰	۱۳/۱۰	۷۶/۲۵	۱۰۶	۱۱/۴۰	۵۳/۵	حداکثر روزانه
.	۰/۱	.	.	۰/۲	.	حداقل روزانه

بحث و نتایج

در طی دوره اعتبارسنجی نیز استفاده شد. این الگوریتم به سبب کارایی آسان و نتایج خوب در مسائل مختلف کاربرد زیادی دارد که با نتایج مطالعات محمدی قلعه‌نی و ابراهیمی [۸] و آدت و دنیس [۱۰] در این زمینه مطابقت دارد. در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ مقادیر اولیه، حداقل، حداکثر و بهینه پارامترهای مربوط به مدل‌های Sacramento AWBM و تانک در شبیه‌سازی رواناب روزانه ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه حوضه آبخیز گرگان رود استان گلستان با استفاده از روش بهینه‌سازی جست‌وجوی مستقیم نشان داده شده است. براساس جدول ۲ مقادیر بهینه پارامتر C1 در مدل AWBM نزدیک به صفر شد که نشان‌دهنده حساسیت بسیار کم پارامتر مربوط به ظرفیت نگهداشت سطحی اول در منطقه تحقیق است. همچنین مقدار پارامترهای A1 (ذخیره سطحی اول) و A2 (ذخیره سطحی دوم) همان مقادیر پیش‌فرض مدل است؛ به طوری که در شبیه‌سازی این پارامترها ثابت نگه داشته شده‌اند که نشان می‌دهد این پارامترها تأثیری در کنترل سیستم مدل AWBM ندارند. همچنین بررسی پارامترهای

شکل‌های ۵ و ۶ و جدول ۵ وضعیت عملکرد مدل‌های بارش-رواناب یکپارچه و مفهومی AWBM، Sacramento و تانک را در طی دوره واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد. با توجه به دشواری روش‌های مبتنی بر سعی و خطا جهت بهینه‌سازی پارامترها، واسنجی به صورت خودکار صورت گرفت. شایان ذکر است تابع هدف اصلی در این مطالعه ضریب ناش-ساتکلیف در نظر گرفته شد و برای رسیدن به بهترین تابع هدف ۵۰۰ بار هر یک از مدل‌ها به اجرا درآمدند. در نهایت خروجی جریان شبیه‌سازی شده با استفاده از تمامی بهینه‌سازهای موجود در مدل‌ها تجزیه و تحلیل شد. نتایج نشان داد که برای واسنجی مقادیر اولیه متغیرهای ورودی به مدل‌ها بهینه‌ساز جست‌وجوی مستقیم^۱ نسبت به سایر بهینه‌سازها بهترین کارایی را داشت. بنابراین این بهینه‌ساز برای شبیه‌سازی جریان

1. Pattern search

تانك دوم و ارتفاع رواناب سطحى تانك چهارم در رواناب شبیه‌سازى شده رواناب منطقه تحقیق است. بهینه‌سازى پارامترهاى مدل تانك نشان می‌دهد که به‌منظور بهبود دبی اوج ساير پارامترهاى مدل جزء پارامترهاى بسیار حساس در منطقه تحقیق است که با تغییر این پارامترها دبی اوج نیز به‌صورت چشمگیری تغییر می‌یابد [۳].

مقایسه کردارى بين رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازى شده با استفاده از مدل‌هاى Sacramento، AWBM و تانك در شكل‌هاى ۵ و ۶ نشان می‌دهد که همبستگی زیادى بين رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازى شده در هر يك از مدل‌ها وجود دارد و روند کلی رواناب شبیه‌سازى شده از رواناب مشاهده‌ای تبعیت می‌کند. همچنین اختلاف بسیار ناچیزی بين نتایج شبیه‌سازى شده در هر يك از مدل‌ها وجود دارد که دليل آن می‌تواند ساختار غیرتوزیعی بودن تمامی مدل‌ها و دامنه محدود تغییرات پارامترهاى هر يك از این مدل‌ها باشد. بررسی نمودارهاى مربوط به سرى زمانى و نمودار پراکنندگی مدل‌ها در مرحله واسنجى و صحت‌سنجى (شكل‌هاى ۷ و ۸) نشان داد که مدل‌هاى مذکور توانایی قابل قبولی در شبیه‌سازى مقادير بیشینه (a) در منطقه تحقیق ندارند، درحالی که مقادير کمینه (b) را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازى می‌کنند. همچنین این مدل‌ها يك مدل کم برآورد^۱ در شبیه‌سازى دبی هستند و با اینکه شبیه‌سازى را با دقت بالایی انجام می‌دهند، مقدار دبی شبیه‌سازى شده (به‌ویژه مقادير اوج جریان) به‌مراتب کمتر از مقادير مشاهده‌ای و پایین‌تر از خط ۱ به ۱ هستند. این نتایج با مطالعات روحانى و فراهی مقدم [۳] همخوانی دارد.

مختلف موجود در مدل sacramento نشان داد که پارامترهاى مربوط به بخش توسعه‌دهنده منطقه نفوذناپذیر تحت شرایط اشباع خاک، پارامتر نسبتى از حداکثر آب آزاد اولیه منطقه پایینی که به‌عنوان جریان پایه روزانه تخلیه می‌شود، پارامتر نسبتى از حداکثر آب مازاد آزاد منطقه پایینی که به‌عنوان جریان پایه روزانه تخلیه می‌شود، پارامتر بخش نفوذناپذیر حوضه که به تولید رواناب مستقیم منجر می‌شود و پارامتر نسبتى حداکثر آب آزاد منطقه فوقانی که به‌عنوان جریان زیر قشرى روزانه تخلیه می‌شود دارای مقادير نزدیک به صفر هستند و کمترین تأثیر را بر دبی خروجی از حوضه دارند و پارامتر مربوط به جریان پایه مشاهده‌شده‌ای، که حوضه را به‌عنوان جریان آب‌هاى زیرزمینی ترک می‌کند مقدار صفر دارد که نشان می‌دهد این پارامترها تأثیری در کنترل سیستم مدل sacramento ندارند. همچنین مقدار پارامترهاى مربوط به نسبت آب آزاد منطقه پایینی موجود برای نفوذ، پارامتر مربوط به نسبت آب تحت پوشش آبراهه‌ها، دریاچه‌ها و پوشش گیاهى و حجم جریانی که می‌تواند توسط مواد متخلخل در بستر جریان منتقل شود همان مقادير پیش‌فرض مدل است. بهینه‌سازى پارامترهاى مدل sacramento نشان می‌دهد که به‌منظور بهبود دبی اوج ساير پارامترهاى مدل جزء پارامترهاى بسیار حساس در منطقه تحقیق است که با تغییر این پارامترها دبی اوج نیز به‌صورت چشمگیری تغییر می‌یابد. در نهایت براساس جدول ۳ مقادير بهینه پارامترهاى a12، a21، alpha و b1 در مدل AWBM نزدیک به صفر شد که نشان‌دهنده حساسیت بسیار کم پارامترهاى ضریب رواناب دوم سطحى تانك اول، ضریب رواناب میانی دوم، ضریب رواناب مربوط به خروجی هر تانك، ضریب نفوذ تانك اول به

جدول ۲. مقادير اولیه، دامنه تغییرات و بهینه‌شده پارامترهاى مختلف مدل AWBM

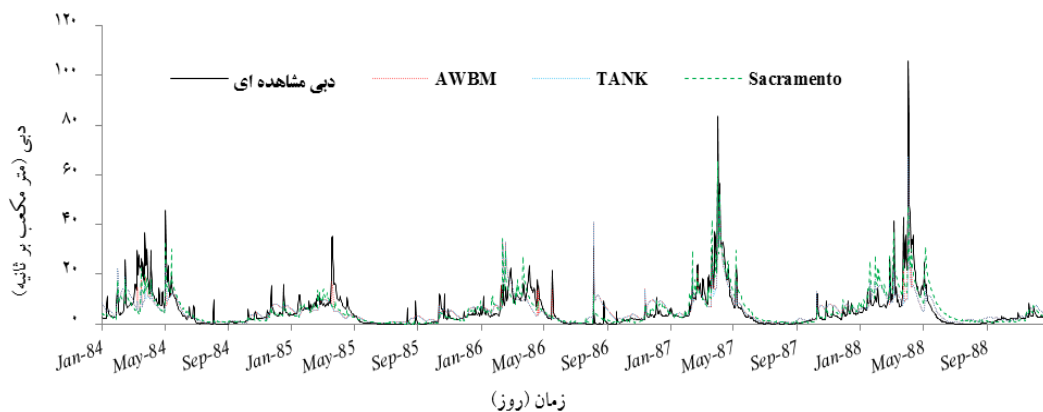
مقادير بهینه	محدوده تغییر پارامتر	مقدار اولیه	پارامتر
۰/۱۳۴	۰-۱	۰/۱۳۴	A1 (ذخیره سطحى اول)
۰/۴۳۳	۰-۱	۰/۴۳۳	A2 (ذخیره سطحى دوم)
۰/۸۷۸	۰-۱	۰/۴۵	BFI (شاخص جریان پایه)
۰/۷۸۴	۰-۵۰	۷	C1 (ظرفیت نگاه‌داشت سطحى اول)
۹۹/۶۰	۰-۲۰۰	۷۰	C2 (ظرفیت نگاه‌داشت سطحى دوم)
۳۸۴/۳۱	۰-۵۰۰	۱۵۰	C3 (ظرفیت نگاه‌داشت سطحى سوم)
۰/۹۶۸	۰-۱	۰/۹۵۰	KBase (ضریب بازگشت جریان پایه روزانه)
۰/۴۷۸	۰-۱	۰/۳۵	KSurf (ضریب بازگشت جریان سطحى روزانه)

جدول ۳. مقادیر اولیه، دامنه تغییرات و بهینه‌شده پارامترهای مختلف مدل sacramento

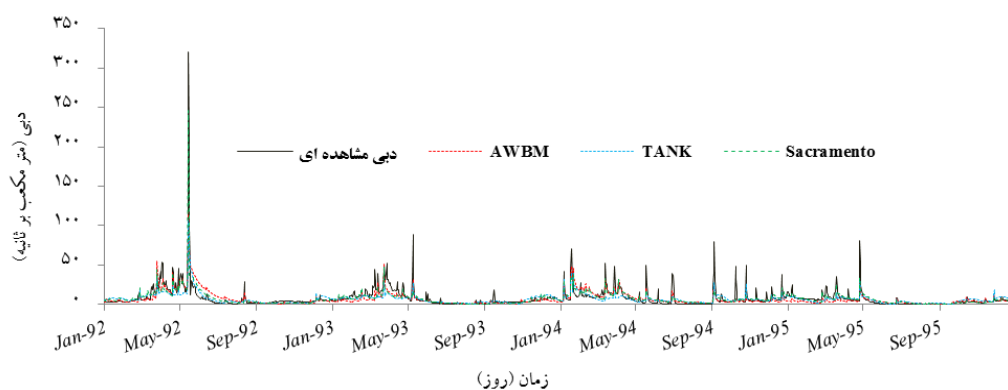
پارامتر	مقدار پیش‌فرض	محدوده تغییر پارامتر	مقادیر بهینه
Adimp (بخش اضافی PCTIM که توسعه‌دهنده منطقه نفوذناپذیر تحت شرایط اشباع خاک است)	۰/۰۱	۰-۱	۰/۰۲۱
Lzfp (حداکثر آب آزاد اولیه منطقه پایینی)	۴۰	۰-۵۰	۲۵/۵۲۱
Lzfs (حداکثر آب مازاد آزاد منطقه پایینی)	۲۳	۰-۵۰	۸/۰۴۸
Lzpk (نسبتی از آب در LZFP که به‌عنوان جریان پایه روزانه تخلیه می‌شود)	۰/۰۰۹	۰-۱	۰/۰۳۲
Lzsk (نسبتی از آب در LZFS که به‌عنوان جریان پایه روزانه تخلیه می‌شود)	۰/۰۴۳	۰-۱	۰/۰۶۰
Lztw (حداکثر کشش آب منطقه پایینی)	۱۳۰	۰-۴۰۰	۱۶۵/۴۰
Pctim (بخش نفوذناپذیر حوضه که به تولید رواناب مستقیم منجر می‌شود)	۰/۰۱	۰-۱	۰/۰۱۱
Pfree (حداقل سهم نفوذ آب از منطقه بالایی به منطقه پایینی برای تغذیه مخزن‌های آب آزاد منطقه)	۰/۰۶۳	۰-۱	۰/۵۹۲
Rexp (توان تعیین‌کننده نرخ تغییرات نفوذ با تغییر ذخیره‌سازی آب منطقه پایینی)	۱	۰-۳	۱/۱۲۰
Rserv (کسری از آب آزاد منطقه پایینی که برای نفوذ موجود است)	۰/۳	۰-۱	۰/۳
Sarva (کسری که به‌طور معمول توسط آبراهه‌ها، دریاچه‌ها و پوشش گیاهی پوشیده شده است)	۰/۰۱	۰-۱	۰/۰۱
Side (کسری از جریان پایه مشاهده‌شده‌ای، که حوضه را به‌عنوان جریان آب‌های زیرزمینی ترک می‌کند)	۰	۰-۱	۰
Ssout (حجم جریانی که می‌تواند توسط مواد متخلخل در بستر جریان منتقل شود)	۰/۰۰۱	۰-۱	۰/۰۰۱
Uzfw (حداکثر آب آزاد منطقه فوقانی)	۴۰	۰-۸۰	۳۴/۷۴
Uzk (نسبتی از آب در UZFW که به‌عنوان جریان زیر قشری روزانه تخلیه می‌شود)	۰/۲۴۵	۰-۱	۰/۰۶۹
Uztw (حداکثر کشش آب منطقه بالایی)	۵۰	۰-۱۰۰	۶۵/۱۹۰
Zperc (فاکتوری که به‌منظور تعریف حداکثر نرخ نفوذ به‌کار می‌رود)	۴۰	۰-۸۰	۷۹/۹۴۸

جدول ۴. مقادیر اولیه، دامنه تغییرات و بهینه‌شده پارامترهای مختلف مدل تانک

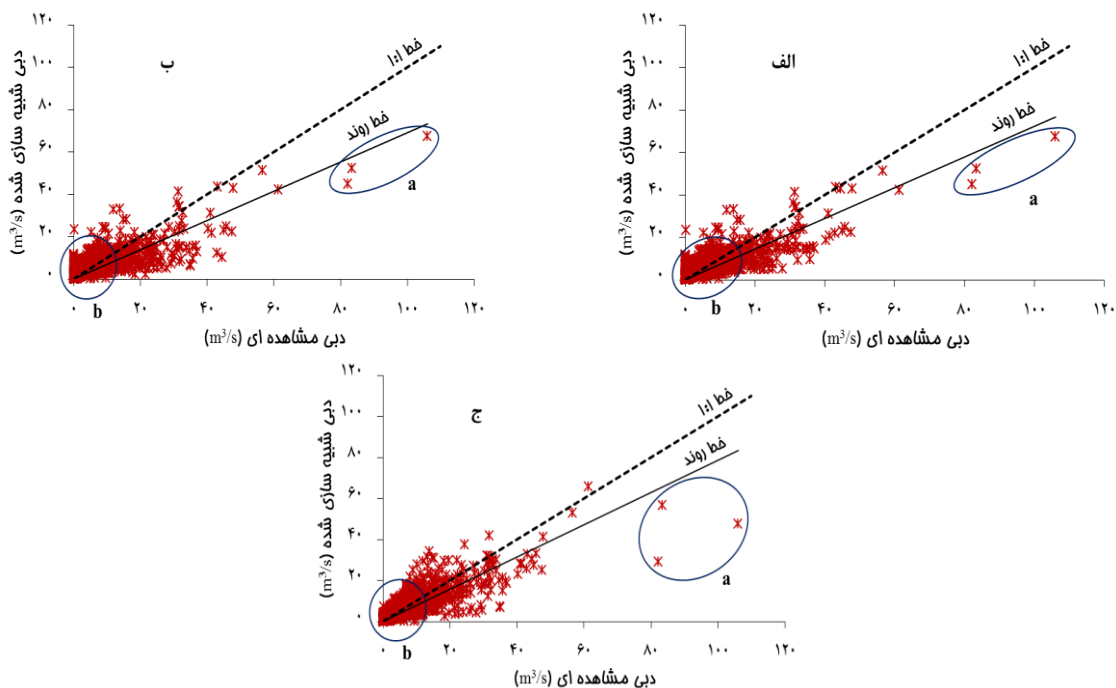
پارامتر	مقدار اولیه	محدوده تغییر پارامتر	مقادیر بهینه
H11 (ارتفاع رواناب سطحی تانک اول (خروجی اول))	۰	۰-۵۰۰	۳۵۶/۸۶
a11 (ضریب رواناب اول سطحی تانک اول)	۰/۲	۰-۱	۰/۳۹۲
a12 (ضریب رواناب دوم سطحی تانک اول)	۰/۲	۰-۱	۰/۰۳۹
a21 (ضریب رواناب میانی دوم)	۰/۲	۰-۱	۰/۱۶۰
a31 (ضریب رواناب زیر پایه (زیرین) تانک سوم)	۰/۲	۰-۱	۰/۳۸۴
a41 (ضریب رواناب پایه تانک چهارم)	۰/۲	۰-۱	۰/۹۸۰
Alpha (ضریب رواناب مربوط به خروجی هر تانک)	۰/۱	۰-۱	۰/۰۳۹
b1 (ضریب نفوذ تانک اول به تانک دوم)	۰/۲	۰-۱	۰/۰۰۳
b2 (ضریب نفوذ تانک دوم به تانک سوم)	۰/۲	۰-۱	۰/۹۹۶
b3 (ضریب نفوذ تانک سوم به تانک چهارم)	۰/۲	۰-۱	۰/۹۹۲
C1 (سطح آب مخزن در تانک اول)	۲۰	۰-۱۰۰	۱۱/۳۷۲
C2 (سطح آب مخزن در تانک دوم)	۲۰	۰-۱۰۰	۴۱/۵۶۸
C3 (سطح آب مخزن در تانک سوم)	۲۰	۰-۱۰۰	۲۱/۵۶۸
C4 (سطح آب مخزن در تانک چهارم)	۲۰	۰-۱۰۰	۳۹/۲۱۵
H12 (ارتفاع رواناب سطحی تانک اول (خروجی دوم))	۰	۰-۳۰۰	۱۸۷/۰۵۸
H21 (ارتفاع رواناب سطحی تانک دوم)	۰	۰-۱۰۰	۲۸/۶۲۷
H31 (ارتفاع رواناب سطحی تانک سوم)	۰	۰-۱۰۰	۳۹/۶۰۷
H41 (ارتفاع رواناب سطحی تانک چهارم)	۰	۰-۱۰۰	۰/۷۸۴



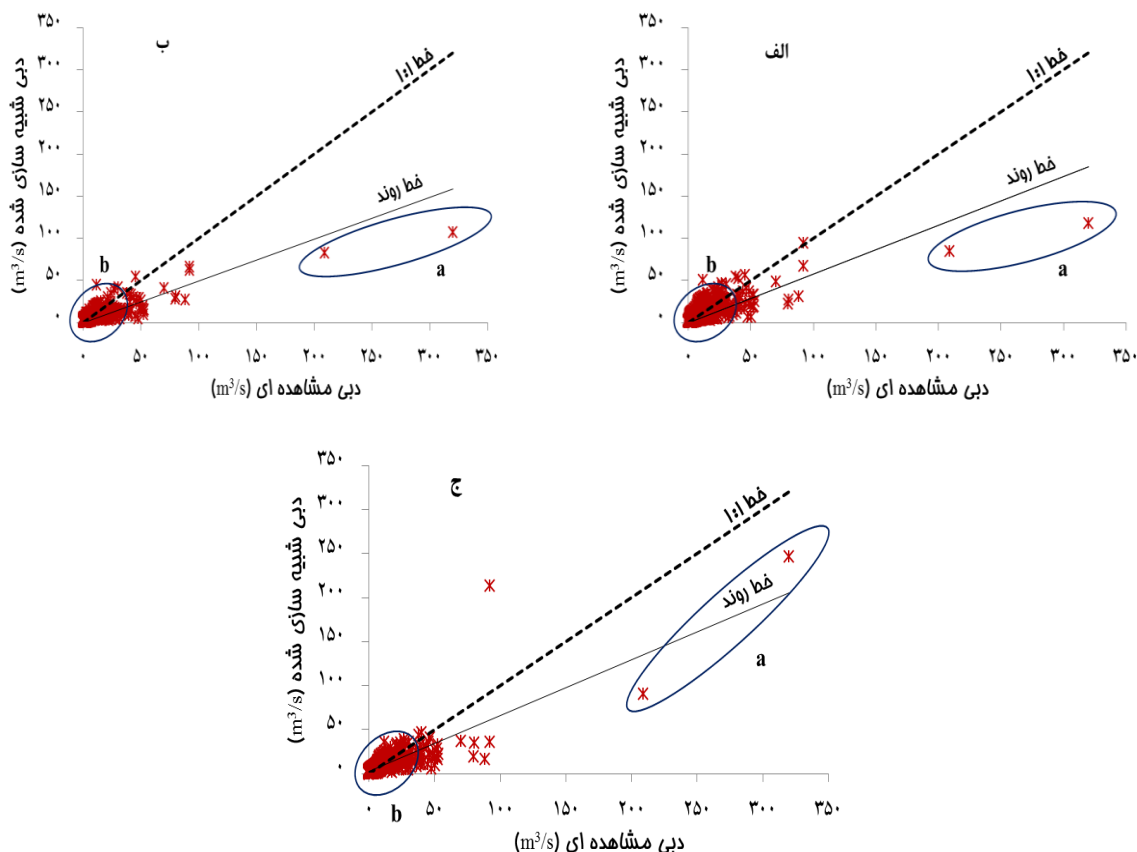
شکل ۵. سري زماني منتخب دبی روزانه شبیه‌سازی و مشاهده‌ای در دوره‌ی واسنجی



شکل ۶. سري زماني منتخب دبی روزانه شبیه‌سازی و مشاهده‌ای در دوره‌ی صحت‌سنجی



شکل ۷. پراکنش نقطه‌ای مقادير مشاهده‌ای و برآوردی دبی روزانه در طی دوره‌ی واسنجی در مدل AWBM (الف)، تانک (ب) و Sacramento (ج)



شکل ۸. پراکنش نقطه‌ای مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی دبی روزانه در طی دوره اعتبارسنجی در مدل AWBM (الف)، تانک (ب) و sacramento (ج)

برابر $0/613$ ، $0/787$ و $4/985$ و در طی دوره صحت‌سنجی برابر $0/546$ ، $0/802$ و $9/380$ است. به‌طور کلی مقادیر بالای ضریب کارایی E_{NS} و R^2 و مقدار پایین آماره $RMSE$ در طی هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی نشان‌دهنده دقت بالای مدل‌های مذکور است؛ به‌طوری که این مدل‌ها به‌خوبی الگوی تغییرات رواناب منطقه تحقیق را شبیه‌سازی کرده‌اند. سانتی و همکاران [۲۰] و گاسمن و همکاران [۱۵] مقادیر E_{NS} بالاتر از $0/5$ را مقدار قابل قبول برای مدل‌های هیدرولوژیکی می‌دانند که نشان‌دهنده دقت زیاد هر سه مدل در منطقه تحقیق است. نتایج با نتایج پژوهش‌های زرین و همکاران [۴]، شریفی و بوید [۶]، سنایی‌نیا [۱۹] و دیویا و آشو [۱۴] در مورد استفاده از مدل AWBM؛ مطالعات روحانی و فراهی مقدم [۳]، چن و آدامز [۱۳] و برهانی داریان و فرهمند [۱] در مورد استفاده از مدل تانک و مطالعات وراگ و همکاران [۲۵] و واز و همکاران [۲۴] در زمینه استفاده از مدل Sacramento در شبیه‌سازی درست رواناب مطابقت دارد.

شاخص‌های ارزیابی دقت مدل در شبیه‌سازی رواناب روزانه ایستگاه هیدرومتری آرازکوسه در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج آماری پژوهش مانند مطالعات گودرزی و همکاران [۷] و وانگ و همکاران [۲۶] نشان داد که شبیه‌سازی در طی دوره واسنجی نسبت به دوره اعتبارسنجی دقت بیشتری دارد. همچنین مدل sacramento در طی هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی دقت بیشتری نسبت به دو مدل AWBM و تانک دارد. بر این اساس معیارهای ارزیابی R^2 ، E_{NS} و $RMSE$ در مرحله واسنجی مدل sacramento در پایه زمانی روزانه به‌ترتیب برابر با $0/823$ ، $0/677$ و $4/565$ و در دوره صحت‌سنجی به‌ترتیب $0/719$ ، $0/669$ و $7/905$ است. همچنین مدل AWBM با $E_{NS}=0/657$ ، $R^2=0/811$ و $RMSE=4/717$ در طی دوره واسنجی و $E_{NS}=0/573$ ، $R^2=0/773$ و $RMSE=8/983$ در طی دوره واسنجی در درجه دوم دقت در منطقه تحقیق قرار دارد. همچنین مقادیر E_{NS} ، R^2 و $RMSE$ برای مدل تانک در طی دوره واسنجی

جدول ۵. ضرایب آماری ارزیابی دقت مدل‌ها در شبیه‌سازی رواناب روزانه در طی دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی

صحت‌سنجی			واسنجی			مدل
RMSE	R ²	E _{NS}	RMSE	R ²	E _{NS}	
۸/۹۸۳	۰/۷۷۳	۰/۵۷۳	۴/۷۱۷	۰/۸۱۱	۰/۶۵۷	AWBM
۹/۳۸۰	۰/۸۰۲	۰/۵۴۶	۴/۹۸۵	۰/۷۸۷	۰/۶۱۳	تانک
۷/۹۰۵	۰/۷۱۹	۰/۶۶۹	۴/۵۶۵	۰/۸۲۳	۰/۶۷۷	sacramento

نتیجه‌گیری

با توجه به دامنه وسیع مدل‌های هیدرولوژیکی موجود، انتخاب مناسب‌ترین مدل برای هر کاری به دلیل افزایش بهره‌وری دشوار است. مدل‌هایی که با توجه به نقص و کمبود آمار طولانی مدت و دقیق بتوانند نتایج قابل قبولی را ارائه دهند، می‌توانند به عنوان ابزاری کارآمد در خدمت مدیر حوضه آبخیز باشند. از این رو در مطالعه حاضر، کارایی مدل‌های بارش رواناب و غیرتوزیعی Sacramento، AWBM و تانک در بسته نرم‌افزاری RRL در شبیه‌سازی رواناب روزانه حوضه آبخیز گرگان رود و در محل ایستگاه هیدرومتری آرازکوسه بررسی شد و پارامترهای مؤثر بر بارش - رواناب برای منطقه بهینه‌سازی شدند. به طور کلی تطابق زیادی بین مقادیر اوج بارندگی با رواناب شبیه‌سازی شده و رواناب خروجی از حوضه وجود دارد. به عبارتی دیگر اوج بارندگی مربوط به روزها و ماه‌های پرباران سال است و در ایام فاقد بارندگی مقادیر شبیه‌سازی شده دبی صفر است که علت آن، نادیده گرفتن جریان آب پایه و آب زیرزمینی برای حوضه توسط مدل‌هاست. براساس شاخص‌های آماری و نموداری به کاررفته در این مطالعه، هر سه مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی شبیه‌سازی قابل قبولی از رواناب داشتند (E_{NS} بالای ۰/۶۱۳، R² بالای ۰/۷۸۷ و RMSE کمتر از ۴/۹۸۵ در طی دوره واسنجی و E_{NS} بالای ۰/۵۴۶، R² بالای ۰/۷۱۹ و RMSE کمتر از ۹/۳۸۰ در طی دوره اعتبارسنجی). همچنین نتایج نشان داد که مدل Sacramento در طی هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی دارای بهترین کارایی در بین سایر مدل‌هاست. بررسی‌ها نشان داد که بهینه‌ساز جست‌وجوی مستقیم نسبت به سایر بهینه‌سازها بهترین کارایی را در منطقه تحقیق داشت. توجه شود که بین ضرایب نش برای ارزیابی مدل‌ها تفاوت زیادی دیده نمی‌شود

که ممکن است دلیل این موضوع این باشد که تمامی مدل‌ها از نوع مفهومی و یکپارچه‌اند و در همه مدل‌ها قسمت‌های مختلف رطوبت خاک عامل اصلی تولید رواناب است، از این رو انتظار می‌رفت مقادیر ضرایب کارایی مدل‌ها نزدیک به هم باشد و تقریباً نتایج شبیه‌سازی در تمامی مدل‌ها مشابه هم باشد. با توجه به نمودارهای پراکندگی و هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای به دست آمده از مدل‌های بررسی شده می‌توان نتیجه گرفت که این مدل‌ها توانایی شبیه‌سازی مقادیر بیشینه را ندارند اما مقادیر کمینه و متوسط را به خوبی شبیه‌سازی کرده‌اند و تفاوت چندانی بین مقادیر متوسط شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای وجود ندارد. دلیل این موضوع می‌تواند این باشد که تمامی مدل‌های بررسی شده از نوع یکپارچه‌اند که در آنها عوامل مؤثر دیگری در تولید و روندیابی سیل مانند خصوصیات رودخانه اصلی، ضریب زبری، کاربری اراضی منطقه، خصوصیات زمین‌شناسی و ... نادیده گرفته شده است. پس می‌توان نتیجه گرفت از این مدل‌ها در منطقه تحقیق نمی‌توان برای بررسی خشکسالی و سیل استفاده کرد، بلکه تنها برای برآورد مقدار متوسط رواناب در زمینه مدیریت منابع آب استفاده کرد. در انتها می‌توان نتیجه گرفت این مدل‌ها می‌توانند شبیه‌سازی قابل قبولی در شرایط کشور ما داشته باشند و قادرند با اطلاعات قابل دسترس پاسخ حوضه‌های فاقد آمار را محاسبه کنند و از قابلیت خوبی در طراحی و تحقیق برخوردارند.

منابع

- برهانی داریان، علیرضا؛ فرهمندفر، زینب، ۱۳۹۰، کالیبراسیون مدل‌های بارش - رواناب به کمک الگوریتم‌های فراکاشی، فصلنامه آبیاری و آب، سال اول، شماره ۴: ۷۱-۶۰.

[۹]. هاشمی، مهدی؛ مهرابی، حمید، ۱۳۸۶، توسعه مدل بارش - رواناب با استفاده از GIS. همایش ژئوماتیک. ۹ ص.

[10]. Audet, C., and Dennis Jr, J.E., 2002. Analysis of generalized pattern searches. *SIAM Journal on Optimization*, 13(3): 889-903.

[11]. Beven, K.J., 2001. *Rainfall- Runoff modeling, the primer*, Wiley, Chichester, UK: 361pp.

[12]. Boughton, W. 2002. *AWBM Catchment Water Balance Model. Calibration and Operation Manual*: 30p.

[13]. Chen, J. and Adams, B.J., 2006. Integration of artificial neural networks with conceptual models in rainfall-runoff modeling. *Journal of hydrology*. 318: 232-249.

[14]. Divya, B., and Ashu, J., 2010, Comparison of Various Optimization Methods for Calibration of Conceptual Rainfall-Runoff Models, *EGU General Assembly*: p.9463.

[15]. Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H. and Arnold, J.G., 2007. *The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions*. *Trans. ASABE*: 50(4): 1211-1250.

[16]. Lowry, B., 2005. *Evapotranspiration estimation methods for Sacramento Soil Moisture Accounting model streamflow prediction*. Msc thesis university of New Hampshire.

[17]. Nash, J.E. and Sutcliffe, J. 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part 1, A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10: 282-290.

[18]. Rostamian, R., Jaleha, A., Afyunia, M., Mousavian, S.F., Heidarpour, M., Jalalian, A. and Abbaspour, K.C., 2010. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological Sciences Journal*: 53(5): 977 - 988.

[19]. Sanaeiniya, Gh. 2000. Evaluation of AWBM Rainfall-Runoff Simulation model, M.Sc. Thesis of Irrigation and Drainage, Islamic Azad University, 145p.

[20]. Santhi C., Arnold JG., Williams JR., Dugas WA., Srinivasan R. and Hauck LM. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. American Water Resour.* 37:5: 1169-1188.

[۲]. بهمنش، جواد؛ جباری، آناهیتا؛ منتصری، مجید؛ رضایی، حسین، ۱۳۹۲، مقایسه مدل‌های AWBM و SimHyd در مدل‌سازی بارش- رواناب (مطالعه موردی: حوضه آبریز نازلوچای استان آذربایجان غربی). *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*. ۵۲(۴) : ۱۶۸-۱۵۵.

[۳]. روحانی، حامد؛ فراهی مقدم، محسن، ۱۳۹۲، واسنجی خودکار دو مدل بارش- رواناب تانک و SIMHYD با استفاده از الگوریتم ژنتیک. *نشریه مرتع و آبخیزداری*. ۶۶(۴) : ۵۳۳-۵۲۱.

[۴]. زرین، هدایت‌الله؛ مقدم‌نیا، علیرضا؛ نام‌درست، جواد؛ مساعدی، ابوالفضل، ۱۳۹۲، شبیه‌سازی رواناب خروجی در حوزه‌های آبخیز بدون آمار با استفاده از مدل بارش-رواناب AWBM (مطالعه موردی: استان سیستان و بلوچستان). *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۰(۲) : ۲۰۸-۱۹۵.

[۵]. سلمانی، حسین، ۱۳۹۰، بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در بارش - رواناب در مدل نیمه‌توزیعی SWAT (مطالعه موردی زیرحوضه قزاقلی حوضه گرگان‌رود استان گلستان)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده منابع طبیعی. دانشگاه تهران. ۱۵۸ صفحه.

[۶]. شریفی، فرود؛ صفاریپور، شبنم؛ ایوب‌زاده، علی؛ وکیل‌پور، جعفر. ۱۳۸۳. بررسی عوامل مؤثر در تعیین آستانه شروع رواناب در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور به کمک استفاده از شبیه‌سازی و داده‌های بارش- رواناب. *مجله منابع طبیعی ایران*، ۱(۱) : ۵۷-۴۵-۳۳.

[۷]. گودرزی، محمدرضا؛ ذهبیون، باقر؛ مساح‌بوانی، علیرضا؛ کمال، علیرضا، ۱۳۹۱، مقایسه عملکرد سه مدل هیدرولوژی SWAT، IHACRES و SimHyd در شبیه‌سازی رواناب حوضه قره‌سو. *مدیریت آب و آبیاری*، ۲(۱) : ۴۰-۲۵.

[۸]. محمدی قلعه‌نی، مهدی و ابراهیمی، کیومرث. ۱۳۹۱، ارزیابی الگوریتم‌های جستجوی مستقیم و ژنتیک در بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام- یک سیلاب از کارون، *مدیریت آب و آبیاری*، ۲(۲) : ۱-۱۲.

- [21]. Sharifi, F., and Boyd, M.J. 1994. A Comparison of the SFB and AWBM Rainfall-Runoff Models, 25th Congress of the International Association of Hydrogeologists/ International Hydrology & Water Resources Symposium of the Institution of Engineers, Australia. ADELAIDE. 21-25 November: 491-495.
- [22]. Spruill, C.A., Workman, S.R. and Taraba, J.L., 2000. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watershed using the SWAT model. Soil and Water Division of ASAE: No.98-05-109: 1431-1440.
- [23]. Sugawara, M., 1995. Tank model. In: Singh VP (Ed). Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publication, Littleton, Colorado. 177-189.
- [24]. Vaze, J., Chiew, F.H.S., Perraud, J.M., Viney, N., Post, D., Teng, J., Wang, B. and Goswami, M., 2010. Rainfall-runoff modeling across southeast Australia: Datasets, models and results, Australian Journal of Water Resources. 14(2): 101-116.
- [25]. Vrugt, J.A., Gupta, H.V., Dekker S.C., Sorooshian S. and Wagener T.B.W., 2006. Application of stochastic parameter optimization to the Sacramento soil moisture accounting model. Journal of Hydrolog. 325(1): 288-307.
- [26]. Wang, G., Zhang, J., and He, R., 2007, Comparison of hydrological models in the middle reach of the Yellow River. Methodology in hydrology: 158-163.
- [27]. Willems, P., 2009. A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models. Environmental Modeling Software 24(3), 311-321.
- [28]. Yue, S., and Hashino, M., 2000. Unit hydrographs to model quick and slow runoff components streamflow. Journal of Hydrology. 227: 195-206.