ارزیابی کارآیی مدل‌های بارش رواناب AWBM، Sacramento، SimHyd و Tank در حوزه آبخیز پل فسا

فاطمه فروتن[۱]، بهارک معتمدوزیری[۲*]، هادی کیادلیری[۳] و مهدی سرایی‌تبریزی[۴]

۱) دانشجوی دکتری رشته علوم و مهندسی آبخیزداری گرایش حفاظت آب و خاک، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲) دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

*رایانامه نویسنده مسئول مکاتبات: bmvaziri@gmail.com

۳) دانشیار گروه علوم محیط زیست و جنگل، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۴) استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۱

چکیده

مدل‌های هیدرولوژی ابزار موثری برای مدیریت منابع آب و تغییر اقلیم در چرخه آب و مشخصه‌های جریان می‌باشند. هدف از این پژوهش، ارزیابی عملکرد نسبی مدل‌های بارش- رواناب یکپارچه و مفهومی AWBM، Sacramento، SimHyd و Tank در بسته نرم‌افزاری RRL در شبیه‌سازی رواناب ماهانه حوزه آبخیز پل فسا از زیرحوضه‌های دریاچه مهارلو در استان فارس می‌باشد. تاریخ ۱۳۸۰/۹/۲۳ تا ۱۳۸۱/۱۲/۳۱ جهت دوره گرم کردن مدل، از تاریخ ۱۳۸۲/۰۱/۰۱ تا ۱۳۹۲/۱۲/۳۱ برای دوره واسنجی و از تاریخ ۱۳۹۳/۰۱/۰۱ تا ۱۳۹۹/۹/۲۲ برای دوره اعتبارسنجی استفاده گردید. پس از اجرای مدل‌ها، ارزیابی کمی مقادیر جریان ماهانه شبیه‌سازی‌شده برای مرحله واسنجی و اعتبارسنجی ارایه گردید. از روش آزمون و خطا بر اساس خصوصیات حوزه آبخیز برای تعیین مقادیر بهینه پارامترهای مدل در دوره واسنجی استفاده گردید. مقایسه شاخص‌های آماری (ضریب کارآیی و تبیین) در دوره واسنجی برای مدل‌های AWBM، Sacramento، SimHyd و Tank به‌ترتیب ضریب کارآیی ۰/۷۹، ۰/۰۲-، ۰/۶، ۰/۴۱ و ضریب تبیین ۰/۸۲، ۰/۵۹، ۰/۷۹، ۰/۴۱ و برای دوره اعتبارسنجی به‌ترتیب ضریب کارآیی ۰/۵۳، ۰/۱۹-، ۰/۴۴-، ۰/۰۰۲ و ضریب تبیین ۰/۶۵، ۰/۶۱، ۰/۶۵-، ۰/۳۶- به‌دست آمد. نتایج حاصل از واسنجی برای مدل‌های AWBM و مدل SimHyd نشان از کارآیی خوب مدل در شبیه‌سازی دبی است. نتایج حاصل از اعتبارسنجی برای این دو مدل نسبت به دوره واسنجی نتایج ضعیف‌تر، ولی قابل قبولی ارایه داد که شاید علت آن خشکسالی‌های اخیر دوره اعتبارسنجی نسبت به دوره واسنجی باشد. نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی برای مدل‌های Tank و Sacramento بیانگر عملکرد ضعیف مدل در شبیه‌سازی رواناب می‌باشد. همچنین مدل‌ها در دبی‌های اوج خطای زیادی داشت.

واژه‌های کلیدی: حوزه آبخیز پل فسا، شبیه‌سازی جریان، کارآیی مدل، مدل بارش رواناب.

مقدمه

توسعه و استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی در مقیاس جهانی، قاره‌ای و کشوری در دو دهه اخیر توجه فزآینده‌ای را به خود جلب کرده است. اگرچه کشورهای توسعه‌یافته در توسعه و ارزیابی این مدل‌ها پیشتاز هستند، اما اکثر کشورهای در حال توسعه، اگر گفته نشود همه، حتی مدل‌های مخصوص منطقه خود را ندارند. بنابراین، فرآیند انتخاب مدل مناسب برای این مناطق جهت بهبود مهارت در مدل‌سازی هیدرولوژیکی و پیش‌بینی در مقیاس محلی تا جهانی ضروری است (Paul Pranesh *et al.*, ۲۰۲۱). در سال‌های اخیر پیش‌بینی جریان در رودخانه یکی از مسایل مهم و مورد توجه برای مدیریت منابع آب در ایران است. این پیش‌بینی نیازمند آمار و اطلاعات است که متاسفانه اغلب حوضه‌های کشور فاقد داده‌های با کمیت و کیفیت مورد نظر می‌باشند. مدل‌سازی هیدرولوژیکی از نمونه راهکارهایی است که برای برطرف کردن چالش عدم‌کفایت و عدم وجود داده های باکیفیت مناسب در هیدرولوژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. معیار انتخاب مدل مناسب برای این فرآیند، ارزیابی عملکرد مدل‌ها با توجه به شرایط هیدرولوژیکی هر منطقه است (چوبین و بشیرگنبد، ۱۴۰۲). باتوجه به دامنه متنوع مدل‌های هیدرولوژی در دسترس، انتخاب مناسب‌ترین مدل برای هر کار مخصوصی به‌دلیل افزایش بهره‌وری دشوار است. بنابراین، نیاز به ارزیابی مقایسه‌ای برای تشخیص قابلیت و محدودیت مدل‌های حوضه در منطقه مطالعاتی دارد (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۱). محمدی‌وند و همکاران (۱۳۹۸) عملکرد مدل‌های AWBM، Sacramentoو SimHyd در شبیه سازی رواناب حوضه امامه را با استفاده از بهینه‌ساز واسنجی خودکار الگوریتم ژنتیک ارزیابی کردند. نتایج حاکی از عملکرد بهتر مدل SimHyd نسبت به دو مدل دیگر است. همچنین مدل‌های AWBM و Sacramentoنیز نتایج آماری و گرافیکی رضایت‌بخش و مطلوب در حوضه منتخب داشتند. قربانی‌فرد (۱۴۰۰) مدل‌های AWBM و IHACRES را در حوزه آبخیز کن مقایسه و ارزیابی کرد. بر اساس نتایج به‌دست آمده ضریب نش‌ساتکلیف و ضریب همبستگی برای مدل AWBM به‌ترتیب برابر با ۰/۸۱ و ۰/۸۷ و برای مدل IHACRES به‌ترتیب برابر با ۰/۸۲ و ۰/۸۴ می‌باشد. در نهایت، نتایج نشان داد مدل‌ها، تطبیق قابل قبولی با شرایط منطقه مورد مطالعه دارند. پرواز و شاهویی (۱۴۰۱) دقت مدل یکپارچه AWBM را در شبیه سازی رواناب حوضه دریاچه ارومیه در استان کردستان ارزیابی کردند. نتایج به‌دست آمده نشان داد مدل می‌تواند شبیه‌سازی قابل اعتمادی در شرایط کشور داشته باشد. Vidyarthi و Jain (۲۰۲۳) چهار مدل نیمه توزیع بارش- رواناب را با استفاده از یک مدل یکپارچه ساده با توزیع مکانی از نظر ویژگی‌های آب وهواشناسی و فیزیوگرافی در یک حوضه به‌کار بستند. نتایج نشان داد مدل‌های نیمه توزیعی بهتر از مدل یکپارچه عمل می‌کنند. Reddy و همکاران (۲۰۲۳) مقایسه ای از مدل‌های بارش- رواناب TANK و SimHyd را در حوزه آبخیز هماواتی، حوضه کووری[۱] در هند انجام دادند. مدل TANK از نظر NSE و CC در مقایسه با مدل SimHyd عملکرد رضایت‌بخشی را نشان دادند. همانگونه که تحقیقات گذشته نشان می‌دهد مدل‌های مذکور در ایران و سایر کشورهای جهان مورد استفاده قرار گرفته است و در هر یک از زیرحوزه‌ها یک یا دو مورد از مدل‌ها، عملکرد رضایت‌بخشی داشته‌اند. مدل‌های مختلفی به‌عنوان بهترین مدل هدف از این تحقیق، ارزیابی عملکرد نسبی مدل های بارش- رواناب یکپارچه و مفهومی AWBM، Sacramento، SimHyd و Tank در بسته نرم‌افزاری RRL در شبیه سازی رواناب ماهانه حوزه آبخیز پل فسا از زیرحوضه‌های دریاچه مهارلو در استان فارس می‌باشد. همچنین این پژوهش برای اولین بار در منطقه مورد مطالعه انجام گشته است.

مواد و روش‌ها

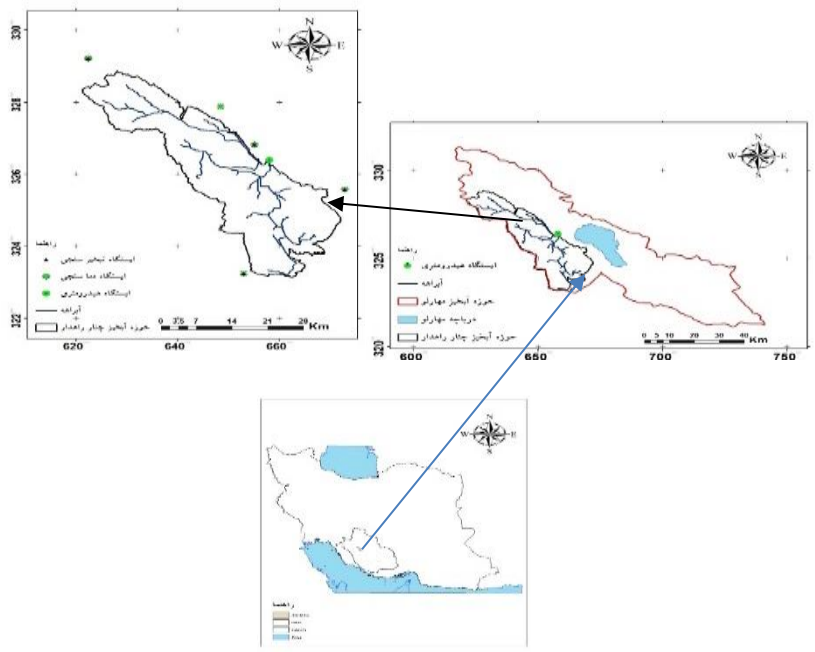
حوزه آبخیز پل فسا، یکی از زیرحوزه‌های آبخیز مهارلو در جنوب‌شرقی شهرستان شیراز با طول جغرافیایی ۶۱۹۹۱۱ تا ۶۷۴۲۳۵ و عرض جغرافیایی ۳۲۲۸۴۹۹ تا ۳۲۸۹۸۷ است که دارای ایستگاه هیدرومتری است. شکل (۱) موقعیت حوزه آبخیز پل فسا را در حوضه مورد مطالعه نشان می‌دهد. منطقه مورد مطالعه در سال‌های اخیر، به‌دلیل افزایش جمعیت و

۱. Cauvery

فعالیت‌های اقتصادی در اطرف رودخانه و واقع بودن در حوزه آبخیز شهری شیراز و یکی از زیرحوزه‌های آبخیز اصلی ورودی به دریاچه مهارلو از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد که اهمیت تحقیق در مورد بارش- رواناب را افزایش می دهد. جدول (۱) لیست ایستگاه‌های مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. نقشه حوزه آبخیز پل فسا نیز در شکل (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱. ایستگاه‌های موجود در داخل و اطراف حوزه آبخیز پل فسا

کد ایستگاه	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	نوع ایستگاه
۰۰۱-۲۴	بند بهمن	۶۵۲۹۹۱	۳۲۳۲۳۰۹	۱۵۹۷	تبخیرسنجی
۰۳۳-۲۴	خانیان	۶۱۱۳۴۰	۳۲۸۲۹۳۷	۱۹۶۶	سنجی‌باران
۱۸۰-۴۳	خلار	۶۱۹۷۳۶	۳۳۱۵۳۸۲	۲۰۵۶	سنجی‌باران
۰۱۲-۲۳	دشت ارژن	۵۹۵۵۴۸	۳۲۸۱۴۰۹	۲۰۲۹	تبخیرسنجی
۰۴۷-۴۳	دوبنه	۶۷۲۸۹۸	۳۲۵۵۷۳۳	۱۴۸۹	تبخیرسنجی
۱	زرقان	۶۶۵۹۳۹	۳۲۹۶۰۱۲	۱۵۹۶	سینوپتیک
۰۶۶-۴۳	شول بند امیر	۶۷۴۸۷۶	۳۲۹۱۷۹۹	۱۶۲۰	سنجی‌باران
۰۴۴-۴۳	شیراز اداره مرکزی	۶۴۸۴۴۳	۳۲۷۸۷۶۳	۱۵۲۲	سنجی‌باران
۲	شیراز	۶۵۵۰۴۳	۳۲۶۸۱۴۴	۱۴۸۴	سینوپتیک
۰۳۸-۴۳	قلات شیراز	۶۲۹۹۳۶	۳۳۰۱۳۱۶	۱۸۸۱	تبخیرسنجی
۱۶۴-۴۳	گشنگان	۶۲۹۹۳۶	۳۲۶۴۸۳۶	۱۱۴۰	سنجی‌باران
۷۷۳-۴۳	مارون	۶۸۱۲۱۱۲	۳۲۹۲۰۸۰	۲۱۳۷	تبخیرسنجی



شکل ۱. موقعیت حوزه آبخیز پل فسا و ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی موجود در آن

در این پژوهش عملکرد چهار مدل هیدرولوژیکی یکپارچه و مفهومی بارش- رواناب AWBM، Sacramento، SimHyd و Tank در بسته نرم‌افزاری RRL در شبیه‌سازی متوسط دبی ماهانه جریان مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. از این رو در این مطالعه، وضعیت رواناب حوضه پل فسا به‌عنوان یکی از مهم‌ترین حوزه‌های آبخیز مهارلو از نظر زیست‌محیطی با

استفاده از مدل‌ها بارش رواناب مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این پژوهش ابتدا نسبت به جمع‌آوری اطلاعات ازجمله داده های اقلیمی بارش، دما، تبخیر و تعرق، داده‌های دبی روزانه در دوره آماری ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹ اقدام گردید. نقشه‌های مرز حوضه، آبراهه‌ها در حوزه آبخیز پل فسا اقدام شد. مهم‌ترین داده‌های ورودی RRL عبارتند از: ۱. بارندگی: سری زمانی پیوسته از داده‌های بارندگی روزانه به صورت میلی‌متر در روز؛ ۲. تبخیر: سری زمانی پیوسته از تبخیر تعرق پتانسیل (PET) با استفاده از روش فائو پنمن مانتیث که نشان‌دهنده تبخیر تعرق حوضه به‌صورت میلی‌متر در روز است؛ ۳. جریان اندازه‌گیری‌شده: مقادیر رواناب روزانه در ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده است. این داده‌ها برای واسنجی مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. واحد مورد قبول برای جریان میلی‌متر در روز یا مترمکعب بر ثانیه است و ۴. مساحت حوزه: این داده برای تبدیل ورودی‌ها و خروجی‌های جریان به عمق رواناب استفاده می‌شود.

مدل AWBM

مدل AWBM یک مدل بیلان آب آبخیز است که رواناب را با بارش در مقیاس ساعتی و روزانه مرتبط می‌کند و برای مدل کردن هیدروگراف سیل، تلفات را از بارش محاسبه می‌کند. این مدل سه سطح ذخیره را برای شبیه‌سازی سطوح جزیی رواناب مورد استفاده قرار می‌دهد. بیلان آب با هر سطح ذخیره جزیی مستقل از سایرین محاسبه می‌شود. این مدل بیلان رطوبت هر سطح جزیی را در مراحل زمانی ساعتی یا روزانه محاسبه می‌کند. در هر مرحله زمانی، بارش به هر سه ذخیره رطوبت سطحی اضافه می‌شود و تبخیر از هر ذخیره کم می‌شود. معادله بیلان آب بدین صورت است (Podger , ۲۰۰۴):

$$Store_{n+1} = Store_n + Rain - Evap \quad (n=۱,۲,۳,....) \qquad (۱)$$

در این معادله اگر میزان رطوبت ذخیره، منفی شود، صفر در نظر گرفته می‌شود، به‌طوری‌که میزان تبخیر از رطوبت موجود بیشتر است. اگر رطوبت ذخیره بیش از ظرفیت مخزن شود، رطوبت مازاد به رواناب تبدیل شده و رطوبت ذخیره، معادل ظرفیت در این مخزن باقی می‌ماند (Podger , ۲۰۰۴). وقتی باران می‌بارد، اول ظرفیت ذخیره C۱، بعد ظرفیت ذخیره C۲، بعد ظرفیت ذخیره C۳ پر می‌شود. وقتی C۱ پر شود، سرریز می‌کند و رواناب آغاز می‌شود. C۱ مناطق با کمترین ظرفیت ذخیره، کمترین قابلیت نفوذ و بیشترین تولید رواناب در هر حوزه مثل مناطق با بزرگ‌ترین ظرفیت ذخیره سطحی، حداکثر نفوذ، حداکثر ذخیره و حداقل رواناب در یک حوزه است (Boughton, ۲۰۰۲).

مدل Sacramento

این مدل یک مدل پیوسته بارش رواناب است که برای تولید جریان روزانه از بارندگی و تبخیر ثبت شده استفاده می‌کند. مطالعات شبیه‌سازی‌شده جریان در مقیاس حوضه مانند مدل IQQM به جریان پیوسته ثبت شده طولانی‌مدت نیاز دارد، درحالی‌که عمدتا این اطلاعات در دسترس نیستند. اگرچه داده‌های ثبت شده طولانی‌مدت بارش در دسترس باشد، می‌تواند با اطلاعات تبخیر برای واسنجی مدل Sacramento ترکیب شده در مقابل داده‌های کوتاه‌مدت جریان رودخانه ممکن است مانند هر مدل‌سازی دیگری موجب ایجاد داده‌های گم‌شده یا ناقص شود. صحت و دقت نتایج حاصل از مدل Sacramento توسط خصوصیات مدل و همچنین توسط کیفیت داده‌های بارش، تبخیر و جریان استفاده شده تعیین می‌شود. به‌خصوص برای مدل Sacramento به این دلیل که این مدل از نوع مدل‌های بارش رواناب یکپارچه[۱] است. مدل Sacramento از رطوبت 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 تبدیل به رواناب می‌شود و از طریق یک هیدروگراف واحد تجربی و یا دستگاه‌های مشابه تبدیل می‌شود. حرکت جانبی آب از ذخایر رطوبت خاک تبدیل به رواناب می‌شود و وارد جریان آبراهه می‌گردد. مدل Sacramento به‌طور کلی از ۱۶ پارامتر برای شبیه‌سازی بیلان آبی استفاده می‌کند که عبارتند از: ۵ پارامتر مشخص‌کننده اندازه رطوبت ذخیره شده در خاک؛ ۳ پارامتر برای میزان جریان جانبی؛ ۳ پارامتر نفوذ آب از لایه‌های بالایی به لایه پایینی ذخیره

۱. Lumped

خاک؛ ۲ پارامتر رواناب مستقیم؛ و ۳ پارامتر تلفات سیستم را محاسبه می‌کنند.

مدل SimHyd

مدل بارش- رواناب SIMHYD یک مدل بارش- رواناب مفهومی است که جریان روزانه آبراهه را از بارش روزانه و داده-های تبخیر تعرق پتانسیل محاسبه می‌نماید. تعداد پارامترهای مدل ۷ پارامتر است. بارش روزانه ابتدا ذخیره برگاب را پر می-کند که هر روز توسط تبخیر خالی می‌شود. بارش مازاد سپس وارد تابع نفوذ می‌شود که ظرفیت نفوذ را تعیین می‌نماید. بارش مازادی که از ظرفیت نفوذ تجاوز می‌کند به رواناب مازاد نفوذ تبدیل می‌شود. رطوبتی که نفوذ می‌کند وارد تابع رطوبت خاک می‌شود و از آنجا آب را به آبراهه (جریان داخلی)، ذخیره آب زیرزمینی و ذخیره رطوبت خاک هدایت می‌کند. جریان داخلی در ابتدا به صورت تابعی خطی از رطوبت خاک تخمین زده می-شود. معادله‌ای که برای شبیه‌سازی جریان داخلی استفاده می-شود تلاش می‌کند تا هر دو فرآیند جریان داخلی و رواناب مازاد بر اشباع را شبیه‌سازی نماید. بنابراین مدل تولید رواناب را از سه منبع بررسی کرده و تخمین می‌زند. این منابع شامل رواناب مازاد بر میزان نفوذ، جریان داخلی و رواناب مازاد بر اشباع و جریان پایه است. تغذیه آب‌های زیرزمینی نیز تخمین زده می-شود که این مورد هم تابعی خطی از رطوبت خاک در نظر گرفته می‌شود و رطوبت باقی‌مانده به ذخیره رطوبتی خاک اضافه می-شود (Podger, ۲۰۰۴).

جدول ۲. پارامترهای مدل Sacramento (کلبعلی، ۱۳۹۴)

پارامتر	واحد	توضیحات
UZTWM	Mm	حداکثر کشش آب زون بالایی، حداکثر مقدار نگه‌داشت آب توسط زون بالایی بین ظرفیت طبیعی و نقطه پژمردگی که می تواند با تبخیر مستقیم و تبخیر و تعرق از سطح خاک از دست رود. این مخزن قبل از هر گونه انتقال آب از منطقه بالا به مخازن دیگر پر شده است.
UZFWM	Mm	حداکثر آب آزاد منطقه فوقانی، این مخزن منبع آب برای جریان زیرقشری و نیروی محرکه انتقال آب به عمق‌های پایین‌تر است.
LZTWM	Mm	حداکثر کشش آب زون پایینی، حداکثر ظرفیت کشش آب منطقه پایینی است. آب در این مخزن تنها توسط تبخیر و تعرق از دست می‌رود.
LZFSM	M	حداکثر آب مازاد منطقه پایینی، حداکثر حجم جریان پایه مازاد که می‌توان استخراج کرد.
LZFPM	Mm	حداکثر آب آزاد منطقه پایینی، حداکثر ظرفیتی که از جریان پایه اولیه می‌توان استخراج کرد.
UZK	l/day	نسبتی از آب در UZFWM که به‌عنوان جریان زیرقشری روزانه تخلیه می‌شود.
LZSK	l/day	نسبتی از آب در LZFSM که به‌عنوان جریان پایه روزانه تخلیه می‌شود.
LZPK	l/day	نسبتی از آب در LZFPM که به‌عنوان جریان پایه روزانه تخلیه می‌شود.
PFREE	-	حداقل سهم نفوذ از منطقه بالایی به منطقه پایینی به‌طور مستقیم که برای تغذیه مخزن‌های آب آزاد منطقه پایینی در دسترس است.
REXP	-	توان تعیین‌کننده نرخ تغییرات نفوذ با تغییر ذخیره‌سازی آب منطقه پایینی
ZPERC	-	فاکتوری که برای PBASE که به‌منظور تعریف حداکثر نرخ نفوذ به‌کار می‌رود.
SIDE	-	کسر اعشاری از جریان پایه مشاهده شده‌ای که حوزه را به‌عنوان جریان آب‌های زیرزمینی ترک می‌کند.
SSOUT	$M^3/s/km^2$	حجم جریانی که می‌تواند توسط مواد متخلخل در بستر جریان مستقیم می‌شود.
PCTIM	-	بخش غیرقابل نفوذ حوزه که منجر به تولید رواناب مستقیم می‌شود.
ADIMP	-	بخش‌های اضافی منطقه قبلی که ویژگی‌های منطقه غیرقابل نفوذ را تحت شرایط اشباع خاک توسعه می‌دهد.
SARVA	-	کسر اعشاری که نماینده بخشی از حوزه است که به‌طور معمول توسط آبراهه‌ها، دریاچه‌ها و پوشش گیاهی پوشیده شده است که می‌تواند جریان آبراهه را توسط تبخیر و تعرق تهی کند.

مدل Tank

مدل TANK یک مدل ساده است که شامل ۴ تانک (مخزن) می‌باشد که به صورت سری و عمودی قرار گرفته‌اند. این مدل اولین بار توسط (Sugawara, ۱۹۷۴) اریه گردید و از مدل‌های مفهومی گرده‌ای (یکپارچه)[۱] در هیدرولوژی می‌باشد. با توجه به اینکه این مدل در مقایسه با سایر مدل‌های بارش رواناب چه به لحاظ مفهومی و چه به لحاظ محاسباتی ساده می‌باشد، بیشتر مورد توجه محققین بوده است. در این مدل، حوضه به شکل مجموعه‌ای از مخازن که به صورت سری و عمودی پشت سر هم قرار گرفته‌اند، در نظر گرفته می‌شود. داده‌های مورد نیاز جهت به‌کارگیری و واسنجی این مدل شامل داده‌های بارش، تبخیر و رواناب مشاهداتی می‌باشند. مشکل اصلی در به-کارگیری این مدل، تعیین پارامترهای مدل می‌باشد که معمولا به روش آزمون و خطا تعیین می‌شوند. مقدار کل رواناب شامل مجموع رواناب هر یک از مخازن است که مقدار رواناب هر یک از مخازن از رابطه زیر به‌دست می‌آید (ثانی‌خانی و همکاران، ۱۳۹۱):

$$q = \sum_{x=1}^{4} \sum_{y=1}^{nx} (c_x - H_{xy}) a_{xy} \qquad (۲)$$

در این رابطه q مقدار عمق رواناب (میلی‌متر)، Cx ارتفاع آب در مخزن x، H_{xy} ارتفاع در نقطه خروجی و a_{xy} ضریب رواناب خروجی از مخزن مربوطه می‌باشد.

$$ETA = ETP(1 - EXP(-\alpha \sum_{X=1}^{4} Cx)) \qquad (۳)$$

در این رابطه ETA مقدار تبخیر و تعرق (میلی‌میتر)، ETP تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌میتر) و α ضریب تبخیر و تعرق می‌باشد. همچنین مقدار نفوذ در هر مخزن از رابطه (۴) محاسبه می شود:

$$I_x = C_x B_x \qquad (۴)$$

در این رابطه Ix مقدار نفوذ (میلی‌متر) و x ضریب نفوذ برای مخزن می‌باشد (Podger, ۲۰۰۴).

ارزیابی مدل

به‌منظور ارزیابی کارآیی مدل در تولید هیدروگراف مشاهده‌ای یک‌سری شاخص‌های آماری مورد استفاده قرار می-گیرند. علاوه بر مقایسه چشمی به‌منظور ارزیابی بهترین برازش بین هیدروگراف مشاهده‌ای و محاسبه شده، شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بعد از آنالیز نتایج حاصل از مدل‌ها بهترین مدل با توجه به خطای ایجاد شده به وسیله هر مدل انتخاب می‌شود. جهت ارزیابی کارآیی مدل از معیارهای آماری ضریب کارآیی ناش- شاتکلیف[۲] و ضرب تبیین[۳] استفاده گردید (جدول۳).

جدول ۳. معیارهای کارآیی مدل (Me *et al.*, ۲۰۱۵)

آماره	رتبه کارآیی			
	خیلی‌خوب	خوب	بخش‌رضایت	نامناسب
$R^2 = \frac{\left\{\sum_{n=1}^{N}\left[(S_n - \bar{S})(O_n - \bar{O})\right]\right\}^2}{\sum_{n=1}^{N}(O_n - \bar{O})^2 * \sum_{n=1}^{N}(S_n - \bar{S})^2}$	۰/۷–۱	۰/۶–۰/۷	۰/۵–۰/۶	<۰/۵
$NSE = 1 - \frac{\sum_{n=1}^{N}(O_n - S_n)^i}{\sum_{n=1}^{N}(O_n - \bar{O})^i} i = 2$	۰/۷۵–۱	۰/۶۵–۰/۷۵	۰/۵–۰/۶۵	<۰/۵

On دبی مشاهداتی، Sn دبی شبیه‌سازی‌شده، $\bar{O}$ متوسط دبی مشاهداتی، $\bar{S}$ متوسط دبی شبیه‌سازی‌شده، N تعداد داده‌های مشاهداتی، NSE ضریب کارآیی ناش- شاتکلیف و R^2 ضرب تبیین.

۱. Lump
۲. Nash–Sutcliffe efficiency (NSE)
۳. R^2

نتایج

عملکرد هر کدام از مدل‌ها در منطقه مورد مطالعه بررسی شد و نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها در جداول و شکل‌ها آورده شد. برای اجرای هر ۴ مدل مورد استفاده در این تحقیق در حوزه آبخیز پل فسا از تاریخ ۱۳۸۰/۰۹/۲۳ تا ۱۳۸۱/۱۲/۳۱ برای دوره گرم کردن مدل، از تاریخ ۱۳۸۲/۰۱/۰۱ تا ۱۳۹۲/۱۲/۳۱ برای دوره واسنجی و از تاریخ ۱۳۹۳/۰۱/۰۱ تا ۱۳۹۹/۹/۲۲ برای دوره اعتبارسنجی استفاده گردید. پس از اجرای مدل‌ها، ارزیابی کمی مقادیر جریان ماهانه شبیه‌سازی-شده برای مرحله واسنجی و اعتبارسنجی در زیر ارایه شد. سپس به روش آزمون و خطا و بر اساس خصوصیات حوزه آبخیز، مقادیر بهینه پارامترهای مدل در دوره واسنجی تعیین گردید.

نتایج حاصل از مدل AWBM

جدول (۴) مقادیر بهینه پارامترهای مدل AWBM را در حوزه آبخیز پل فسا نشان می‌دهد. مقایسه گرافیکی دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی ماهانه در مرحله واسنجی بیانگر توانایی مدل در شبیه‌سازی رواناب در منطقه می‌باشد و نشان‌دهنده عملکرد نسبی مدل مذکور در شبیه‌سازی رواناب منطقه است (شکل ۲). نتایج مقایسه شاخص‌های آماری در دوره واسنجی (ضریب کارآیی ۰/۷۹ و تبیین ۰/۸۲) هم نشان از کارآیی خوب مدل در شبیه‌سازی دبی می‌باشد. نتایج حاصل از مرحله اعتبارسنجی نیز اگر چه نسبت به دوره واسنجی نتایج ضعیف-تری ارایه داده است (ضریب کارآیی ۰/۵۳ و تبیین ۰/۶۵)، ولی نتایج قابل قبولی ارایه داده که شاید علت آن خشکسالی‌های اخیر دوره اعتبارسنجی نسبت به دوره واسنجی باشد (شکل‌های ۲ و ۳). این مقادیر پایین‌تر از خط یک به یک می‌باشد و مدل تمایل به کمتر برآورد کردن دبی دارد. همچنین نمودارهای مربوطه نیز نشان می‌دهد که همبستگی بالایی بین دبی مشاهداتی، برآوردی و بارندگی وجود دارد (شکل‌های ۲ و ۳).

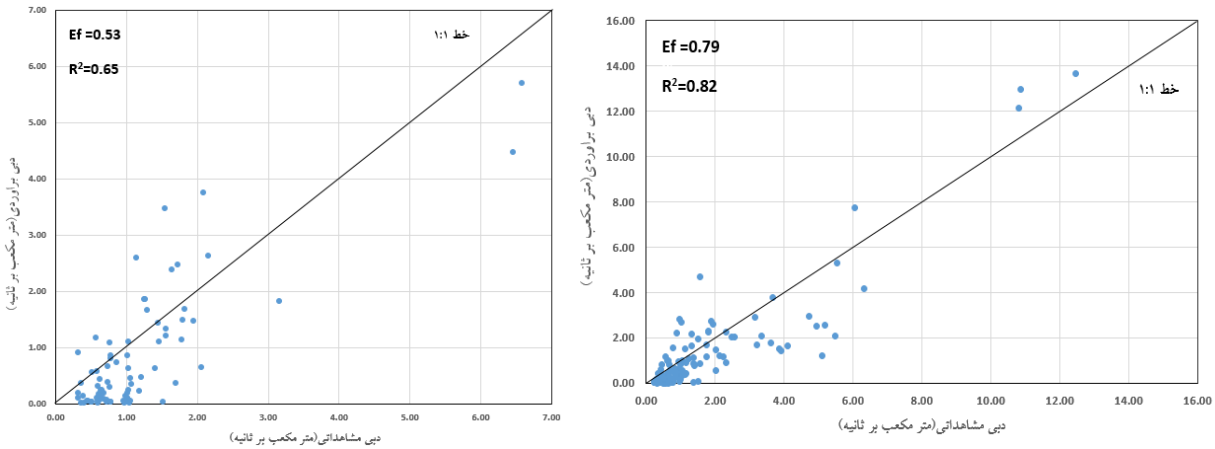
جدول ۴. پارامترهای مدل AWBM، مقادیر قراردادی و محدوده آنها (Podger, ۲۰۰۴)

پارامتر	توصیف	واحد	مقدار	مقدار	مقدار	مقدار بهینه
A۱	سطح جزیی مخزن	بدون	۰/۱۳۴	۰	۱	۰/۱۷۳
A۲	سطح جزیی مخزن	بدون	۰/۴۳۳	۰	۱	۰/۲۶
BFI	شاخص جریان پایه	بدون	۰/۳۵۰	۰	۱	۰/۵۷
C۱	ظرفیت مخزن سطحی اول	میلی‌متر	۷	۰	۵۰	۰/۵۸
C۲	ظرفیت مخزن سطحی	میلی‌متر	۷۰	۰	۲۰۰	۸۱/۵۶
C۳	ظرفیت مخزن سطحی	میلی‌متر	۱۵۰	۰/۰۰۰	۵۰۰	۳۱۱/۳۷۶
KBASE	خشکیدگی جریان پایه	بر روز	۰/۹۵۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۹۸
KSURF	خشکیدگی جریان سطحی	بر روز	۰/۳۵۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۸۹

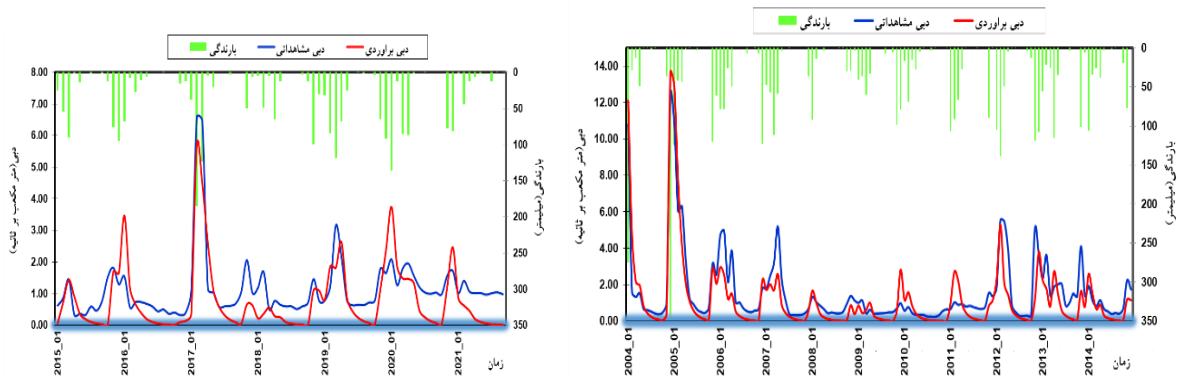
نتایج حاصل از مدل Sacramento

جدول (۵) مقادیر بهینه پارامترهای مدل Sacramento را در حوزه آبخیز پل فسا نشان می‌دهد. مقایسه گرافیکی دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی در مرحله واسنجی بیانگر عدم‌توانایی مدل در شبیه‌سازی رواناب در منطقه می‌باشد (شکل‌های ۴ و ۵). نتایج مقایسه شاخص‌های آماری در دوره واسنجی (ضریب کارآیی ۰/۰۲- و تبیین ۰/۵۹) هم نشان از کارآیی نامناسب مدل در شبیه‌سازی دبی است. نتایج حاصل از مرحله اعتبارسنجی نسبت به دوره واسنجی نتایج ضعیف‌تری ارایه داده (ضریب کارآیی ۰/۱۹- و تبیین ۰/۶۱) و نتایج قابل قابلی ارایه نداده است. این مقادیر بالاتر از خط یک به یک می‌باشد و مدل تمایل به بیش برآورد کردن دبی دارد (شکل‌های ۴ و ۵). علت شبیه-سازی ضعیف می‌تواند مربوط به خطای مربوط به ساختار خود مدل که برای منطقه خاصی ضرایب کالیبره شده‌اند، باشد. علت دیگر آن است که در این پژوهش دبی‌های مشاهداتی در دوره کالیبراسیون نسبت به دوره اعتبارسنجی بیشتر است. با توجه به

اینکه پارامترها برای دوره‌های با دبی بالاتر کالیبره شده‌اند، برای دوره اعتبارسنجی از دقت کمتری برخوردار می‌باشند.



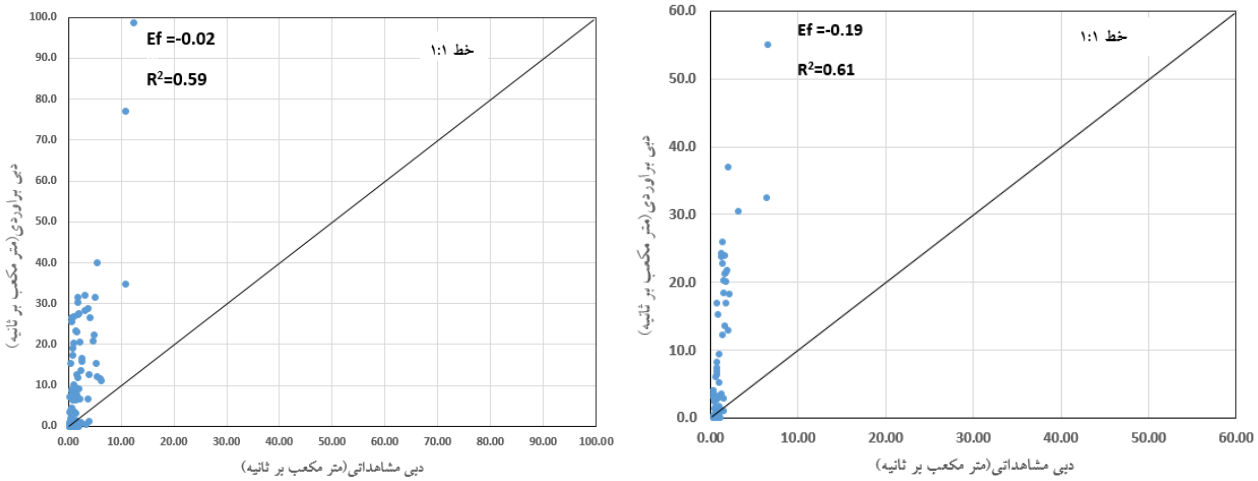
شکل ۲. مقایسه پراکنش مقادیر دبی مشاهداتی و برآوردی مدل AWBM در دوره واسنجی (راست) و اعتبارسنجی (چپ)



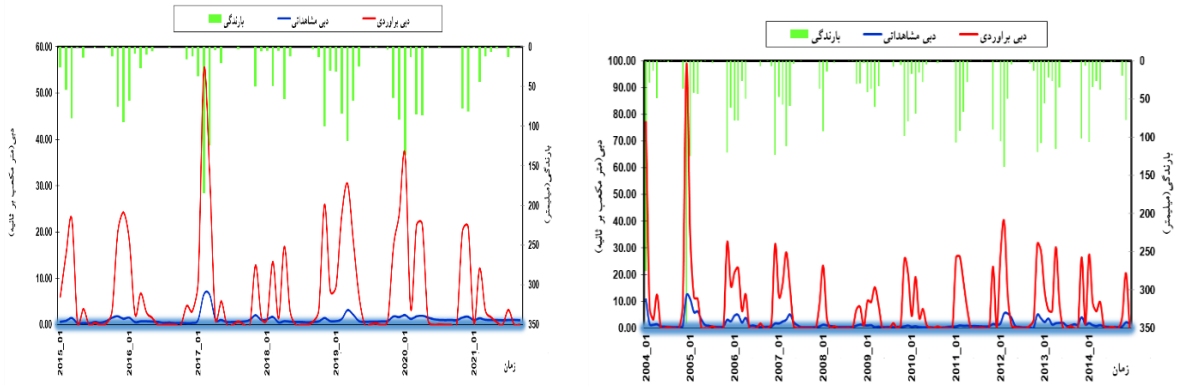
شکل ۳. مقایسه هیدروگراف مقادیر دبی مشاهداتی و برآوردی مدل AWBM در دوره واسنجی (راست) و اعتبارسنجی (چپ)

جدول ۵. پارامترهای مدل Sacramento، مقادیر قراردادی و مقدار بهینه‌شده

پارامتر	واحد	مقدار حداقل	مقدار	مقدار	مقدار برازش-
ADIMP	–	۰	۱	۰/۰۱	۰/۲۴
LZFPM	Mm	۰	۵۰	۴۰	۳۹/۱۵
LZFSM	M	۰	۵۰	۲۳	۳/۲
LZPK	l/day	۰	۱	۰/۰۰۹	۰/۶۹
LZSK	l/day	۰	۱	۰/۰۴۳	۰/۶۹
LZTWM	Mm	۰	۴۰۰	۱۳۰	۹۸/۳۲
PCTIM	–	۰	۱	۰/۰۱	۱
PFREE	–	۰	۱	۰/۰۶۳	۰/۵۹
REXP	–	۰	۳	۱	۱/۸۵
Reserv		۰	۱	۰/۳	۰/۸۱
SARVA	–	۰	۱	۰/۰۱	۰
SIDE	–	۰	۱	۰	۰/۱۸
SSOUT	$M^3/s/km^2$	۰	۱	۰/۰۰۱	۰
UZFWM	Mm	۰	۸۰	۴۰	۱۲/۱۲۶
UZK	l/day	۰	۱	۰/۲۴۵	۰
UZTWM	Mm	۰	۱	۵۰	۷/۹
ZPERC	–	۰	۸۰	۴۰	۱۸/۱۹



شکل ۴. مقایسه پراکنش مقادیر دبی مشاهداتی و برآوردی مدل Sacramento در واسنجی (راست) و اعتبارسنجی (چپ)



شکل ۵. مقایسه هیدروگراف مقادیر دبی مشاهداتی و برآوردی مدل Sacramento در دوره واسنجی (راست) و اعتبارسنجی (چپ)

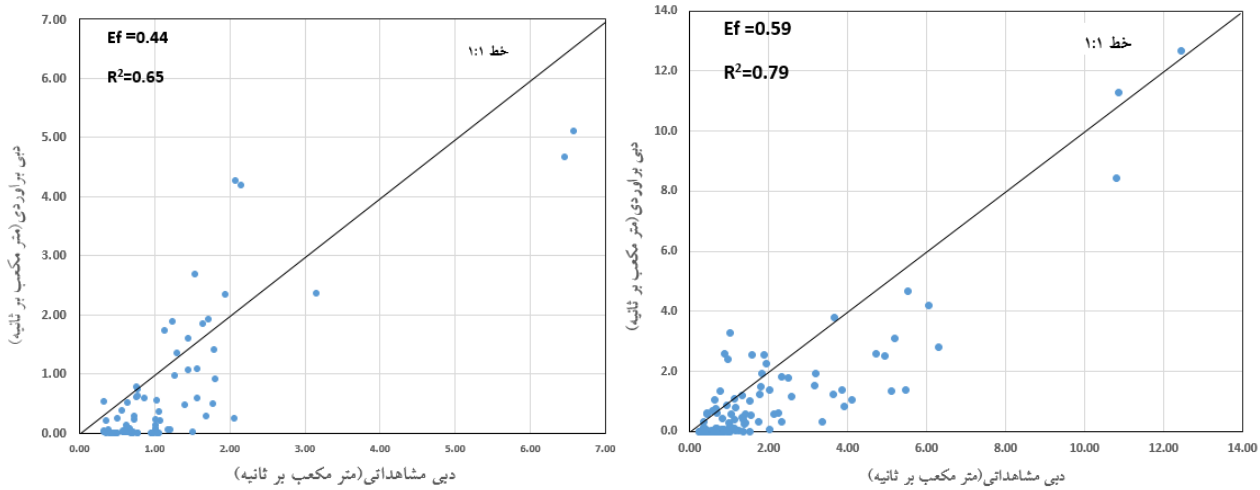
نتایج حاصل از مدل SimHyd

جدول (۶) مقادیر بهینه پارامترهای مدل Simhyd را در حوزه آبخیز پل فسا نشان می‌دهد. مقایسه گرافیکی دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی در مرحله واسنجی بیانگر توانایی نسبی مدل در شبیه‌سازی رواناب در منطقه می‌باشد که نشان‌دهنده عملکرد نسبی مدل مذکور در شبیه‌سازی رواناب منطقه است و فقط مقادیر دبی‌های پایه را کم برآورد کرده است (شکل‌های ۶ و ۷). نتایج مقایسه شاخص‌های آماری در دوره واسنجی (ضریب کارآیی ۰/۶ و تبیین ۰/۷۹) هم نشان از کارآیی خوب مدل در شبیه‌سازی دبی می‌باشد. نتایج حاصل از مرحله اعتبارسنجی نیز اگرچه نسبت به دوره واسنجی نتایج ضعیف‌تری ارایه داده است (ضریب کارآیی ۰/۴۴ و تبیین ۰/۶۵)، ولی نتایج نسبتا قابل قبولی ارایه داده که شاید علت آن خشکسالی‌های اخیر دوره اعتبارسنجی نسبت به دوره واسنجی باشد. در دوره اعتبارسنجی نیز مقادیر جریان پایه نسبت به دوره مشاهداتی کم برآورد شده است (شکل‌های ۶ و ۷). این مقادیر پایین‌تر از خط یک به یک می‌باشد و مدل تمایل به کمتر برآورد کردن دبی دارد. همچنین نمودار(۷) نشان می‌دهد که همبستگی بالایی بین دبی مشاهداتی، برآوردی و بارندگی وجود دارد.

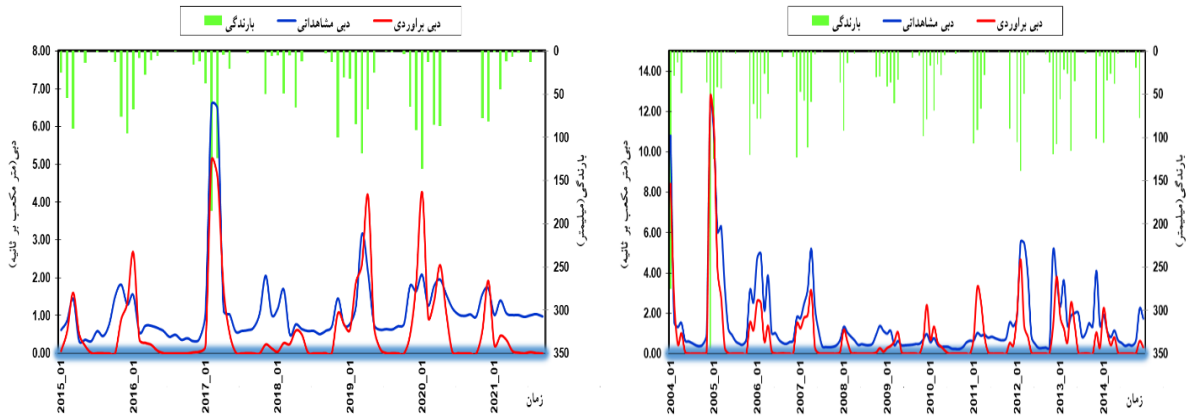
جدول ۶. پارامترهای مدل SIMHYD، مقادیر قراردادی و محدوده آنها (Podger, ۲۰۰۴)

پارامتر	توصیف	قراردادی	حداقل	حداکثر	بهینه
Baseflow coefficient	شاخص جریان پایه	۰/۳	۰	۱	۰/۰۹
Impervious threshold	آستانه نفوذناپذیری	۱	۰	۵	۲/۶
Infiltration coefficient	ضریب نفوذ	۲۰۰	۰	۴۰۰	۲۸۵/۴

Infiltration shape	شکل نفوذ	۳	۰	۱۰	۱/۸۴
Interflow coefficient	ضریب جریان ورودی	۰/۱	۰	۱	۰/۱۲
Pervious fraction	سهم نفوذ	۰/۹	۰	۱	۰/۹۹
Rainfall Interception Store Capacity	ظرفیت ذخیره برگاب بارش	۱/۵	۰	۵	۰/۱۳
Recharge Coefficient	ضریب تغذیه	۰/۲	۰	۱	۰/۴۷
Soil moisture Store Capacity	ظرفیت ذخیره رطوبتی خاک	۳۲۰	۱	۵۰۰	۴۲۵/۶



شکل ۶. مقایسه پراکنش مقادیر دبی مشاهداتی و برآوردی مدل Simhyd در دوره واسنجی (راست) و اعتبارسنجی (چپ)



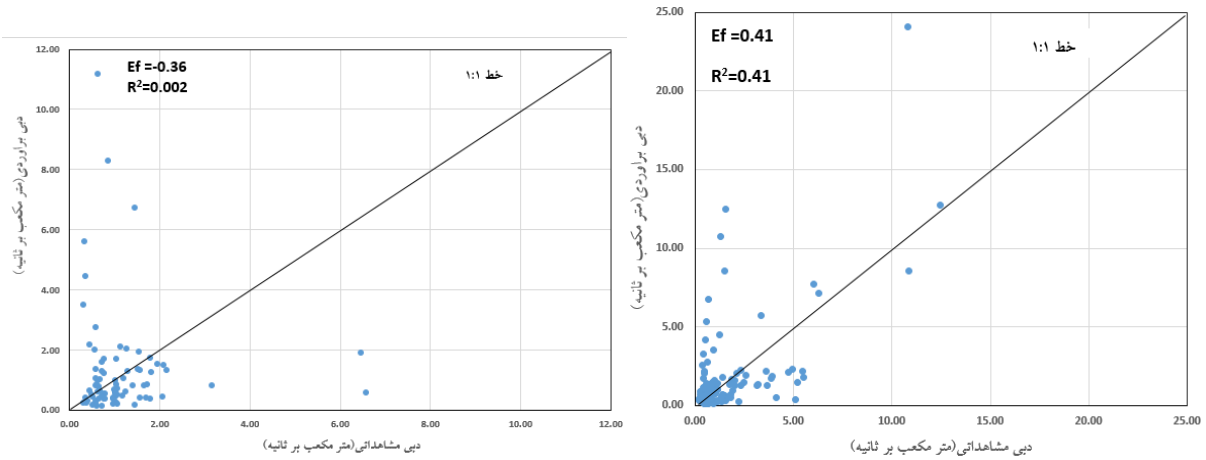
شکل ۷. مقایسه هیدروگراف مقادیر دبی مشاهداتی و برآوردی مدل Simhyd در دوره واسنجی (راست) و اعتبارسنجی (چپ)

نتایج حاصل از مدل Tank

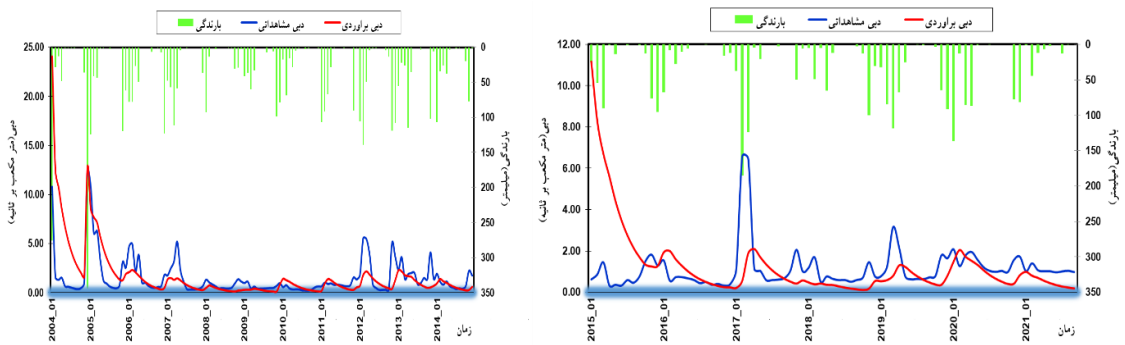
جدول (۷) مقادیر بهینه پارامترهای مدل Tank را در حوزه آبخیز پل فسا نشان می‌دهد. مقایسه گرافیکی دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی در مرحله واسنجی بیانگر عملکرد ضعیف مدل در شبیه‌سازی رواناب در منطقه می‌باشد (شکل‌های ۸ و ۹). نتایج مقایسه شاخص‌های آماری در دوره واسنجی (ضریب کارآیی ۰/۴۱ و تبیین ۰/۴۱) هم نشان از کارآیی ضعیف مدل در شبیه-سازی دبی می‌باشد. نتایج حاصل از مرحله اعتبارسنجی نیز بیانگر ضعف این مدل در شبیه‌سازی دبی می‌باشد (شکل‌های ۸ و ۹). همچنین نمودارهای مربوطه نشان می‌دهد که در زمان-هایی با بارش بالا مقادیر دبی نیز از خود افزایش نشان می‌دهد. برای مدل مذکور در دوره واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد که در برخی رخدادها اگر چه مدل سعی در مدل‌سازی کل نقاط هیدروگراف دارد، اما تابع مورد نظر تمامی نقاط پیک را به خوبی شبیه‌سازی نمی‌کند.

جدول ۷. مقادیر پیش فرض پارامترها برای مدل TANK(کلبعلی، ۱۳۹۴)

پارامتر	مقدار پیش‌فرض	کمینه پیش‌فرض	بیشینه پیش‌فرض	مقدار بهینه
(ارتفاع رواناب سطحی تانک اول خروجی اول)H۱۱	۰	۰	۵۰۰	۴۱۹
(ضریب رواناب اول سطحی تانک اول)a۱۱	۰/۲	۰/۰	۱	۰۹/۷۹
(ضریب رواناب دوم سطحی تانک اول)A۱۲	۰/۲	۰/۰	۱	۰/۰۱۵
(ضریب رواناب میانی دوم)A۲۱	۰/۲	۰/۰	۱	۰/۴۹
(ضریب رواناب زیرپایه (زیرین) تانک سوم)A۳۱	۰/۲	۰/۰	۱	۰/۴۴
(ضریب رواناب پایه تانک چهارم)A٤۱	۰/۲	۰/۰	۱	۰/۰۳۵
(ضریب رواناب مربوط به خروجی هر تانک)Alpha	۰/۱	۰/۰	۱/۰	۳/۳۷
(ضریب نفوذ تانک اول به تانک دوم)b۱	۰/۲	۰/۰	۱/۰	۰/۰۱۱
(ضریب نفوذ تانک دوم به تانک سوم)b۲	۰/۲	۰/۰	۱/۰	۰/۰۱۹
(ضریب نفوذ تانک سوم به تانک چهارم)b۳	۰/۲	۰/۰	۱/۰	۰/۸۶
(سطح آب مخزن در تانک اول)c۱	۲۰	۰	۱۰۰	۵۳/۳
(سطح آب مخزن در تانک دوم)c۲	۲۰	۰	۱۰۰	۸۹/۴۱
(سطح آب مخزن در تانک سوم)c۳	۲۰	۰	۱۰۰	۰
(سطح آب مخزن در تانک چهارم)c٤	۲۰	۰	۱۰۰	۶۱
(ارتفاع سطحی تانک اول (خروجی دوم))H۱۲	۰	۰	۳۰۰	۱۱۳
(ارتفاع رواناب سطحی تانک دوم)H۲۱	۰	۰	۱۰۰	۴۷
(ارتفاع رواناب سطحی تانک سوم)H۳۱	۰	۰	۱۰۰	۶۹/۸
(ارتفاع رواناب سطحی تانک چهارم)H٤۱	۰	۰	۱۰۰	۱۶/۴۷



شکل ۸. مقایسه هیدروگراف مقادیر دبی مشاهداتی و برآوردی مدل Tank در دوره واسنجی (راست) و اعتبارسنجی (چپ)



شکل ۹. مقایسه پراکنش مقادیر دبی مشاهداتی و برآوردی مدل Tank در دوره واسنجی (راست) و اعتبارسنجی (چپ)

بحث و نتیجه‌گیری

روش‌های متعددی جهت برآورد رواناب حاصل از بارندگی در حوزه‌های آبخیز وجود دارد. یکی از این روش‌ها استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی است. مدل‌های هیدرولوژیکی این امکان را می‌دهند با شبیه‌سازی فرآیند رواناب- بارش، رواناب حاصل از بارندگی در حوضه‌هایی که جریان رودخانه اندازه‌گیری شده است با حداقل زمان ممکن و کمترین هزینه ارزیابی شود (شریفی و همکاران، ۱۳۸۵). در این پژوهش عملکرد چهار مدل هیدرولوژیکی یکپارچه و مفهومی بارش- رواناب AWBM، Sacramento، SimHyd و Tank در بسته نرم‌افزاری RRL در شبیه‌سازی متوسط دبی ماهانه جریان حوزه پل فسا به‌عنوان یکی از مهم‌ترین حوزه‌های آبخیز مهارلو از نظر زیست‌محیطی با استفاده از مدل‌ها بارش رواناب مورد بررسی قرار گرفت. تاریخ ۱۳۸۰/۰۹/۲۳ تا ۱۳۸۱/۱۲/۳۱ برای دوره گرم کردن مدل، از تاریخ ۱۳۸۲/۰۱/۰۱ تا ۱۳۹۲/۱۲/۳۱ برای دوره واسنجی و از تاریخ ۱۳۹۳/۰۱/۰۱ تا ۱۳۹۹/۹/۲۲ برای دوره اعتبارسنجی استفاده گردید. پس از اجرای مدل‌ها، ارزیابی کمی مقادیر جریان ماهانه شبیه‌سازی‌شده برای مرحله واسنجی و اعتبارسنجی ارایه گردید. سپس به روش آزمون و خطا و بر اساس خصوصیات حوزه آبخیز، مقادیر بهینه پارامترهای مدل در دوره واسنجی تعیین گردید. نتایج مقایسه شاخص‌های آماری در دوره واسنجی برای مدل‌های AWBM، Sacramento، SimHyd و Tank در جدول (۸) نشان داده شد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد در مقیاس ماهانه، مقادیر ضریب تبیین با توجه به Moriasi و همکاران (۲۰۰۷) و Me و همکاران (۲۰۱۵) که بین ۱-۰/۷ را خیلی‌خوب و ۰/۷-۰/۶ را خوب و کمتر از ۰/۵ را نامناسب ارزیابی نموده، در هر دو دوره کالیبراسیون و اعتبارسنجی، مدل تانک نامناسب می‌باشد. در دوره کالیبراسیون، مدل Simhyd و AWBM در طبقه خیلی-خوب و مدل ساکرامنتو در طبقه خوب، در دوره اعتبارسنجی هر سه مدل Simhyd، AWBM و ساکرامنتو در طبقه خوب موقعیت دارند. مقادیر ضریب کارآیی با توجه به Moriasi و همکاران (۲۰۰۷) و Me و همکاران (۲۰۱۵) که از ۱-۰/۷۵ را خیلی‌خوب و ۰/۷۵-۰/۶۵ را رضایت‌بخش و کمتر از ۰/۵ را نامناسب ارزیابی نمودند، در هر دو دوره کالیبراسیون و اعتبارسنجی، مدل تانک و ساکرامنتو، همچنین در دوره اعتبارسنجی نیز مدل Simhyd نامناسب بودند، در دوره کالیبراسیون مدل SimHyd رضایت‌بخش و مدل AWBM خیلی‌خوب و در دوره اعتبارسنجی مدل AWBM رضایت-بخش بودند. نتایج حاصل از واسنجی برای مدل‌های AWBM و مدل SimHyd نشان از کارآیی خوب مدل در شبیه‌سازی دبی بود، اما در مدل SimHyd مقادیر دبی‌های پایه کم برآورد شد. به‌طور کلی تطابق بالایی بین مقادیر اوج بارندگی با رواناب شبیه‌سازی‌شده و رواناب خروجی از حوضه در این دو مدل وجود دارد. به عبارتی دیگر اوج بارندگی مربوط به روزها و ماه‌های پرباران سال می‌باشد و در ایام فاقد بارندگی مقادیر شبیه‌سازی‌شده دبی کاهش می‌یابد. توجه شود که بین ضریب ناش و ضریب تبیین در این دو مدل نتایج مطلوبی ارایه داده است که ممکن است دلیل این موضوع باشد و این مدل‌ها از نوع مفهومی و یکپارچه می‌باشند، بنابراین انتظار می‌رود مقادیر ضریب کارآیی مدل‌ها نزدیک به هم باشد و تقریبا نتایج شبیه-سازی در این مدل‌ها مشابه هم باشند. Yang و همکاران (۲۰۲۲) بیان کردند که برای حوزه‌های آبخیز با روابط غیر ثابت بارندگی- رواناب برای دستیابی به شبیه‌سازی‌های پایدار، یک دوره واسنجی طولانی‌تری مورد نیاز است. نتایج حاصل از تحقیق کلبعلی (۱۳۹۴) نیز با توجه به مطالب ذکر شده مطابقت دارد و کارآیی این دو مدل را در شبیه‌سازی رواناب ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه حوزه آبخیز گرگان‌رود استان گلستان تایید نموده است. Ramezani و همکاران (۲۰۲۳) نیز در جنوب‌شرقی کوئینزلند، استرالیا با مدل SIMHYD نتایج رضایت‌بخشی به‌دست آورند. نتایج تحقیق محمدی‌وند و همکاران (۱۳۹۸) نیز حاکی از عملکرد خوب مدل SimHyd و سپس مدل AWBM در شبیه‌سازی رواناب حوضه امامه بود. همچنین شریفی و همکاران (۱۳۸۵) در تعدادی از زیرحوضه-های حوزه آبخیز کارون، عباسی‌زاده و نام‌درست (۱۳۸۷) در تعدادی از زیرحوضه‌های مهارلو، مندکل و زهره، قربانی‌فرد (۱۴۰۰) در حوزه آبخیز کن و پرواز و شاهویی (۱۴۰۱) در حوضه دریاچه ارومیه در استان کردستان نشان دادند که مدل AWBM، تطبیق قابل قبولی با شرایط منطقه دارد.

نتایج حاصل از واسنجی برای مدل‌های Tank و Sacramento بیانگر عملکرد ضعیف مدل در شبیه‌سازی رواناب

می‌باشد. نتایج حاصل از اعتبارسنجی برای مدل‌های AWBM و SimHyd نیز اگرچه نسبت به دوره واسنجی نتایج ضعیف‌تری ارایه داد، ولی نتایج قابل قبول بودند که شاید علت آن خشکسالی‌های اخیر دوره اعتبارسنجی نسبت به دوره واسنجی باشد. این مقادیر پایین‌تر از خط یک به یک می‌باشد و مدل تمایل به کمتر برآورد کردن دبی دارد و همبستگی بالایی بین دبی مشاهداتی، برآوردی و بارندگی وجود دارد. نتایج حاصل از اعتبارسنجی برای مدل‌های Tank و Sacramento بیانگر ضعف این مدل در شبیه‌سازی دبی می‌باشد. در مدل Tank در زمان‌هایی با بارش بالا مقادیر دبی نیز از خود افزایش نشان می‌دهد. در مدل Sacramento این مقادیر بالاتر از خط یک به یک می‌باشد و مدل تمایل به بیش‌برآورد کردن دبی دارد. Trivedii و همکاران (۲۰۱۸) نیز با بررسی مدل AWBM درحوضه شیپرا به این نتیجه رسیدند که اگر بارندگی افزایش یابد رواناب نیز افزایش می‌یابد و اگر بارندگی کاهش یابد رواناب نیز کاهش می‌یابد. Vaze و همکاران (۲۰۱۰) نیز با تحقیق بر مدل‌های (Simhyd-Sacramento-Ihacres-SMARG) بیان نمودند که عموما مشکل است مدلی که در یک دوره مرطوب کالیبره شده، برای دوره خشک و یا مدل کالیبره شده در دوره خشک برای پیش بینی رواناب دوره مرطوب مورد استفاده قرار گیرد. روحانی و فراهی‌مقدم (۱۳۹۲) در حوزه آبخیز چهل‌چای، نشان دادند کارآیی مدل SIMHYD از مدل تانک بهتر است. نتایج حاصل از تحقیق مردانی (۱۳۹۶) نیز نشان از واسنجی ضعیف و پایین بودن ضرایب ناشی از مدل TANKبود. همچنین با توجه به در نظر نگرفتن پارامترهای مربوط به خصوصیات رودخانه اصلی، ضریب زبری، کاربری اراضی حوزه آبخیز، خصوصیات زمین‌شناسی و دیگر مشخصات فیزیکی حوضه از این مدل‌ها نمی‌توان برای مطالعه و بررسی سیل در حوضه منتخب تحقیق استفاده نمود، بلکه تنها برای برآورد مقادیر کمینه و متوسط رواناب در زمینه مدیریت منابع آب استفاده کرد. به‌عنوان یک مشکل پیچیده هیدرولوژیکی، مدل‌سازی بارش- رواناب (RR) در مطالعات رواناب، تامین آب، مسایل آبیاری و مدیریت زیست‌محیطی اهمیت دارند (Mohammadi *et al.*, ۲۰۲۲). باید توجه داشت که کاربرد مدل‌های مختلف بارش- رواناب در حوضه‌های با اقلیم متفاوت و مقایسه عملکرد آنها، می‌تواند در تعیین مناسب‌ترین مدل تاثیرگذار باشد که می‌بایست طی تحقیق‌های دیگر مورد مطالعه قرار گیرند.

جدول ۸. نتایج معیارهای آماری در دوره اعتبارسنجی و کالیبراسیون

دوره	معیار آماری	AWBM	Sacramento	SimHyd	Tank
کالیبراسیون	ضریب کارآیی	۰/۷۹	-۰/۰۲	۰/۶	۰/۴۱
	ضریب تبیین	۰/۸۲	۰/۵۹	۰/۷۹	۰/۴۱
اعتبارسنجی	ضریب کارآیی	۰/۵۳	-۰/۱۹	۰/۴۴	۰/۰۰۲
	ضریب تبیین	۰/۶۵	۰/۶۱	۰/۶۵	-۰/۳۶

منابع

پرواز، م. و شاهویی، و. (۱۴۰۱) بررسی دقت شبیه‌سازی رواناب ماهانه حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از مدل یکپارچه AWBMدر استان کردستان در ایستگاه سنته. نشریه مطالعات علوم محیط زیست، ۳(۷): ۵۳۴۷-۵۳۵۹.

ثانی‌خانی، ه.، نیازی، ف.، خسروی‌نیا، پ. و دین‌پژوه، ی. (۱۳۹۱) مقایسه عملکرد مدل‌های TANK و SMAR در شبیه‌سازی رواناب خروجی از حوضه‌ها، سومین همایش ملی مدیریت جامع منابع آب، ساری، صفحات ۳۳۵-۴۴۸.

چوبین، م. و بشیرگنبد، م. (۱۴۰۲) ارزیابی کارآیی مدل هیدرولوژیکی IHACRES و شبکه عصبی مصنوعی به‌منظور پیش‌بینی جریان در رودخانه بختیاری. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۴(۲۷): ۱۲۲-۱۱۵.

روحانی، ح. و فراهی‌مقدم، م. (۱۳۹۲) واسنجی خودکار دو مدل بارش- رواناب تانک و SIMHYD با استفاده از الگوریتم ژنتیک. نشریه مرتع و آبخیزداری، منابع طبیعی ایران، ۶۶(۴): ۵۲۱-۵۳۳.

شریفی، ف.، نام‌درست، ج. و زرین، ه.ا. (۱۳۸۵) ارزیابی مدل AWBMدر تعدادی از زیرحوزه‌های، حوزه آبخیز کارون، اولین همایش منطقه‌ای بهره‌برداری از منابع آب حوضه‌های کارون و زاینده‌رود (فرصت‌ها و چالش‌ها)، شهرکرد، ۸ صفحه.

عباسی‌زاده، م. و نام‌درست، ج. (۱۳۸۷) شبیه‌سازی رواناب خروجی در حوزه‌های آبخیز فاقد آمار با استفاده از مدل. کشاورزی پویا (علوم زراعی): ۵(۳): ۲۵۷-۲۶۷.

قربانی‌فرد، م. (۱۴۰۰) مقایسه و ارزیابی مدل‌های AWBM و IHACRESدر مدل‌سازی بارش- رواناب، مطالعه موردی حوضه آبریز کن، دهمین کنفرانس بین‌المللی سامانه‌های سطوح آبگیر باران، دانشگاه کردستان، ۸ صفحه.

کلبعلی، ا. (۱۳۹۴) ارزیابی کارآیی مدل‌های بارش- رواناب SimHyd، Sacramento، AWBM و Tank در شبیه‌سازی رواناب ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه حوضه آبخیز گرگان‌رود استان گلستان. پایان نامه کارشناسی‌ارشد رشته آبخیزداری، دانشگاه زابل، ۸۶ صفحه.

گودرزی، م.، ذهبیون، ب.، مساح‌بوانی، ع. و کمال، ع. (۱۳۹۱) مقایسه عملکرد سه مدل هیدرولوژی SWAT ، IHACRES و SIMHYD در شبیه‌سازی رواناب حوضه قره‌سو. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۲(۱): ۲۵-۴۰.

محمدی‌وند، م.، عراقی‌نژاد، ش.، ابراهیمی، ک. و مدرسی، ف. (۱۳۹۸) ارزیابی عملکرد مدل‌های AWBM ، Sacramento و SimHyd در شبیه‌سازی رواناب حوضه امامه با استفاده از بهینه‌ساز واسنجی خودکار الگوریتم ژنتیک. نشریه تحقیقات آب و خاک ایران، ۷(۵۰): ۱۷۶۹-۱۷۵۹.

مردانی، م. (۱۳۹۶) مقایسه کارآیی مدل‌های مفهومی بارش- رواناب IHACRES، SIMHYD و TANK در شبیه‌سازی جریان رودخانه. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد رشته منابع طبیعی گرایش مهندسی آبخیزداری، دانشگاه شهرکرد، ۷۱ صفحه.

Boughton, W. (۲۰۰۲) AWBM catchment water balance model, Calibration and Operation Manual, ۳۰p.

Me, W., Abell, J.M. and Hamilton, D.P. (۲۰۱۵) Effects of hydrologic conditions on SWAT model performance and parameter sensitivity for a small, mixed land use catchment in New Zealand, Hydrology and Earth System Sciences, ۱۹(۱۰): ۴۱۲۷-۴۱۴۷.

Mohammadi, B., Safari, M.J.S. and Vazifehkhah, S. (۲۰۲۲) IHACRES, GR۴J and MISD-based multi conceptual-machine learning approach for rainfall-runoff modeling. Scientific Reports, ۱۲(۱): ۱۲۰۹۶.

Moriasi, D.N., Arnold, A.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harm۱el, R.D. and Veith, T.L. (۲۰۰۷) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE American Society of Agricultural and Biological Engineers, ۵۰(۳): ۸۸۵,۹۰۰.

Paul Pranesh, K., Zhang, Y., Ma, N., Mishra, A., Panigrahy, N. and Singh, R. (۲۰۲۱) Selecting hydrological models for developing countries: Perspective of global, continental, and country scale models over catchment scale models. Journal of Hydrology, ۶۰۰(۱): ۱۲۳-۱۶۷.

Podger, G. (۲۰۰۴) Rain Runoff Library user guide, CRC for Catchment Hydrology, ۱۱۰p.

Ramezani, M.R., Helfer, F. and Yu, B. (۲۰۲۳) Individual and combined impacts of urbanization and climate change on catchment runoff in Southeast Queensland, Australia. Science of the Total Environment, ۸۶۱(۲۵): ۸۶۱-۸۸۰.

Reddy, N.M., Saravanan, S., Singh, L. and Abijith, D. (۲۰۲۳) Comparative Analysis of TANK and SimHyd Rainfall-Runoff Models in the Hemavathi Watershed, Cauvery Basin, India. In: I. Pal, S. Kolathayar, S. Tawhidul Islam, A. Mukhopadhyay, and I. Ahmed (Eds.), Proceedings of the ۲nd International Symposium on Disaster Resilience and Sustainable Development. Lecture Notes in Civil Engineering, vol ۲۹۴. Springer, Singapore, pp. ۲۳-۷۶.

Sugawara, M. (۱۹۷۴) Tank model and its application to Bird Creek, Wollombi Brook, Bikin Rive, Kitsu River, Sanaga River and Namr Mune. Research Note of the National Research Center for Disaster Prevention, ۱۱: ۱–۶۴.

Trivedii, A., Pyasi S.K. and Galkate, R.V. (۲۰۱۸) Assessment of impact of climate change using RRL AWBM model, National Institute of Hydrology, Walmi Campus, Bhopal. Water and Energy International, ۶(۹): ۵۱-۵۹.

Vaze, J., Post, D.A., Chiew, F.H.S., Perraud, J.-M., Viney, N.R. and Teng, J. (۲۰۱۰) Climate non-stationarity – Validity of calibrated rainfall–runoff models for use in climate change studies. Journal of Hydrology, ۳۹۴(۳-۴): ۴۴۷–۴۵۷.

Vidyarthi Vikas K. and Jain, A. (۲۰۲۳) Development of simple semi-distributed approaches for modelling complex rainfall-runoff process. Hydrological Sciences Journal, ۶۸(۷): ۹۹۸-۱۰۱۵.

Yang, W., Xia, R., Chen, H., Wang, M. and Xu, C.Y. (۲۰۲۲) The impact of calibration conditions on the transferability of conceptual hydrological models under stationary and nonstationary climatic conditions. Journal of Hydrology, ۶۱۳(Part A): ۱۲۸۳۱۰.

Evaluating the performance of AWBM, Sacramento, SimHyd and Tank rainfall models in the Fasa Bridge watershed

Fateme Frotan[۱], Baharak Motamedvaziri[۲*], Hadi Kiadaliri[۳], and Mehdi Saraei Tabrizi[٤]

۱) Ph.D. Candidate of Watershed Management Science and Engineering tendency in water and soil protection, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
۲) Associate Professor, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. *Corresponding Author Email Address: bmvaziri@gmail.com
۳) Associate Professor, Department of Environment and Forest Sciences, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
٤) Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agricultural science and food industry, University of Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Date of Submission: ۲۰۲٤/۰٦/۲۳ Date of Acceptance: ۲۰۲٤/۰۸/۱۱

Abstract

Hydrological models are an effective tool for managing water resources as well as understanding the impact of land use changes and climate change on the water cycle and flow characteristics. The aim of this research is to evaluate the relative performance of integrated and conceptual rainfall-runoff models AWBM, Sacramento, SimHyd and Tank in the RRL software package in simulating the daily runoff of the Fasa Bridge watershed from the sub-basins of Maharlu Lake in Fars province. ۲۳/۹/۲۰۰۲ to ۳۱/۱۲/۲۰۰۳ for the model warming period, from ۰۱/۰۱/۲۰۰٤ to ۳۱/۱۲/۲۰۱٤ for the calibration period and from ۰۱/۰۱/۲۰۱۵ to ۲۲/۹/۲۰۲۱ for the period Validation was used. After the implementation of the models, a quantitative evaluation of the simulated monthly flow values was presented for the calibration and validation stage. Then, by trial and error method and based on the characteristics of the watershed, the optimal values of the model parameters were determined in the calibration period . Comparison of statistical indicators in the calibration period for AWBM, Sacramento, SimHyd and Tank models, efficiency coefficient ۰,۷۹, -۰,۰۲, ۰,٦, ۰,٤۱ and determination coefficient ۰,۸۲, ۰,۵۹, ۰,۷۹, ۰,٤۱, respectively and efficiency coefficient ۰,۵۳, -۰,۱۹, -۰,٤٤, ۰,۰۰۲ and determination coefficient ۰,٦۵, ۰,٦۱, -۰,٦۵, -۰,۳٦ were obtained for the validation period. The calibration results for AWBM and SimHyd models show the good performance of the model in simulation of discharge. Although the results of validation for AWBM and SimHyd models have provided weaker results compared to the calibration period, they have provided acceptable results, which may be due to the recent droughts of the validation period compared to the calibration period. The results of calibration and validation for Tank and Sacramento models indicate the poor performance of the model in simulating runoff. Also, the models have a lot of error in peak discharges.

Keywords: Calibration, Fasa Bridge watershed, Rain runoff model, Validation.