

مقاله علمی-پژوهشی

شبیه‌سازی بارش رواناب با استفاده از ابزار RRL (مطالعه موردی: ایستگاه رحیم‌آباد- دشت سیلاخور)

حجت‌الله یونسی^۱، حسین یوسفی^۲، آزاده ارشیا^۳، یزدان یاراحمدی^{۴*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۲/۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۳/۴

چکیده

برآورد رواناب حاصل از بارش‌های جوی اهمیت خاصی در مطالعات هیدرولوژی، مدیریت حوزه‌های آبخیز و حفاظت آب‌و خاک دارد. برای مدیریت کارآمد حوضه‌ها نیاز به بررسی کارایی مدل‌های هیدرولوژیکی پیش‌ازپیش مشهود است. بسته نرم‌افزاری RRL جهت شبیه‌سازی روابط بارش-رواناب حوضه‌ها طراحی شده است و شامل پنج زیر مدل مفهومی است. در این پژوهش از مدل‌های مفهومی AWBM، SACRAMENTO، SIMHYD، SMAR و TANK برای حوزه آبخیز دشت سیلاخور (ایستگاه رحیم‌آباد) استفاده شد. از داده‌های روزانه بارش، تبخیر و دبی در دوره آماری ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۸ استفاده شد. برای تمام مدل‌های مفهومی از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۰ به‌عنوان دوره تعادل سنجی، از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۳ به‌عنوان واسنجی و از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ به‌عنوان دوره صحت‌سنجی انتخاب شد. در مدل SIMHYD ضریب ناش- ساتکلیف در روش بهینه‌ساز جست‌وجوی مستقیم در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۷۰ و ۰/۶۸ به‌دست آمد که نشان‌دهنده توانایی نسبی این مدل در شبیه‌سازی رواناب در بین سایر مدل‌ها است. در مدل TANK در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک به ترتیب ضریب ناش - ساتکلیف ۰/۴۷ و ۰/۴۴ به‌دست آمد که کم‌ترین کارایی را بین مدل‌ها داشت. نتایج نشان داد که در بین روش‌های مختلف بهینه‌سازی، روش بهینه‌ساز جست‌وجوی مستقیم نتایج بهتری را ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، بارش-رواناب، بسته نرم‌افزاری RRL، بهینه‌سازی، دشت سیلاخور

مقدمه

مکانی حوزه آبخیز و الگوهای زمانی و مکانی بارش از پیچیدگی و درجه غیرخطی بالایی برخوردار است. مدل‌های بارش رواناب بر اساس میزان بازنمایی فرآیند فیزیکی تحت مطالعه به سه دسته مدل‌های فیزیکی، مدل‌های مفهومی و مدل‌های جعبه سیاه تقسیم می‌شوند (Liu et al., 2005). کاربرد موفقیت‌آمیز مدل‌های مفهومی بارش رواناب به چگونگی واسنجی پارامترهای آن‌ها بستگی دارد. این مدل‌ها به‌طور عموم دارای پارامترهای زیادی هستند که نمی‌توان آن‌ها را به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری نمود و لازم است که آن‌ها را طی فرآیند واسنجی تعیین نمود. با وجود عمومیت کاربرد مدل‌های بارش رواناب در صورتی که نتوان یک مقدار بهینه برای پارامترهای آن‌ها تعیین نمود، کاربرد آن مدل‌ها با مشکل مواجه می‌شود. پارامترهای مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی معمولاً با استخراج از خصوصیات توپوگرافی، ویژگی‌های فیزیکی خاک و کاربری اراضی حوضه حاصل می‌شوند. صحت پیش‌بینی‌هایی که یک مدل انجام می‌دهد، بستگی به این موضوع دارد که اولاً ساختمان مدل تا چه حد خوب تعریف شده باشد و

مدل‌های بارش رواناب به‌عنوان ابزاری مهم و ضروری در علوم هیدرولوژی و مدیریت منابع آب به‌شمار می‌روند. نقش و اهمیت فرآیند بارش رواناب در مطالعات منابع آب موجب شده است که این فرآیند از دیرباز مورد توجه متخصصین قرار گیرد (Aytok et al., 2008). رابطه بارش رواناب به‌دلیل وجود خصوصیات متغیر زمانی و

- ۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، ایران
 - ۲- دانشیار گروه انرژی‌های نو و محیط‌زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، ایران
 - ۳- دانشجو کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، ایران
 - ۴- دانشجو دکتری علوم و مهندسی آبخیز، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه کاشان، ایران
- *- نویسنده مسئول: (Email: Yazdan.yarahmadi@ut.ac.ir)

۰/۷۱ برای واسنجی و ۰/۶۳ برای دوره ارزیابی بهترین کارایی را در بین مدل‌ها دارد و مدل SMAR با ضریب ناش ۰/۴۱ و ۰/۳۳ به ترتیب برای دوره‌های واسنجی و ارزیابی پایین‌ترین کارایی را داشت. گودرزی و همکاران (۱۳۹۱) به مقایسه عملکرد سه مدل هیدرولوژی SWAT، IHACRES و SIMHYD در شبیه‌سازی رواناب حوضه قره‌سو پرداختند. نتایج نشان داد که مدل SWAT بهترین عملکرد را از شبیه‌سازی رواناب حوضه نسبت به داده‌های مشاهداتی در دوره صحت‌یابی داشته است. یو و همکاران (۲۰۱۵) به ارزیابی و مقایسه دو مدل AWBM و SIMHYD برای حوضه‌های جنگلی پرداختند. نتایج نشان داد که مدل‌های مفهومی برای مدیریت جنگل‌ها ناکافی هستند. بارلو و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از مدل SIMHYD با دوره آماری ۱۹۷۶ - ۲۰۰۴ در بحث بارش رواناب، به این نتیجه رسیدند که سهم کسر آب‌های زیرزمینی در مدل لحاظ گردد تا در زیر حوضه‌های کوچک جواب‌های دقیقی به‌دست آید. این تحقیق بخشی از پروژه شمال منطقه ویکتوریا در استرالیا بود.

دورا (۲۰۱۱) با استفاده از مدل SACRAMENTO به بررسی خطر آب برای سد East Park کالیفرنیا پرداخت. این مطالعه در منطقه مذکور، با استفاده از جمع‌آوری داده‌ها در سایت Pale Flood صورت گرفت. این مطالعه در رویکردی شبه مونت کارلو برای محاسبه رواناب برای طیف وسیعی از شرایط آب و هوایی مورد استفاده قرار گرفت. طول دوره آماری از ۲۰۰۶ - ۱۹۷۵ به مدت ۳۱ سال به‌صورت مستمر بود. این مدل بیانگر نتایج خوب برای هر دو دوره‌تر و خشک است و نتایج مدل با داده‌های سایت Pale Flood سازگار است. جایزوال و همکاران (۲۰۲۰) به ارزیابی و مقایسه مدل‌های مفهومی بارش رواناب پرداختند. نتایج نشان داد که مدل TANK در بین مدل‌های بسته نرم‌افزاری RRL مناسب‌تر بود. با این حال مدل SWAT با داشتن داده‌های مکانی و اقلیمی تغییرات ناشی از آب‌وهوایی و کاربری اراضی را بهتر نشان دهد. کومار و همکاران (۲۰۱۵) در مورد کاربرد مدل‌های مفهومی و نیمه توزیعی بحث کردند. به‌منظور انتخاب بهترین مدل از مدل‌های MIKESHE، SWAT، HEC-HMS، AWBM، SIMHYD، SACRAMENTO، SMAR و TANK استفاده شد و مدل HEC-SWAT، AWBM، SIMHYD، HMS، SACRAMENTO به‌عنوان مدل برتر شناخته شدند. اونیسا (۲۰۱۶) از پنج مدل هیدرولوژیکی مفهومی شامل TANK، AWBM، SIMHYD، SACRAMENTO و IHACRES در حوضه نیل آبی برای شبیه‌سازی بارش رواناب استفاده کرد و از ضریب ناش به‌عنوان یک اقدام مناسب برای انتخاب بهترین مدل استفاده شد و پیشنهاد کرد که انتخاب مدل باید بر اساس هدف الگوسازی انجام شود. محمدی وند و همکاران (۱۳۹۸) به ارزیابی عملکرد مدل‌های SACRAMENTO، AWBM و SIMHYD در شبیه‌سازی رواناب حوضه امامه با استفاده از بهینه‌ساز واسنجی خودکار الگوریتم ژنتیک

ثانیاً پارامترهای مدل تا چه حد به واقعیت نزدیک‌تر باشند. با این وجود، تخمین پارامترهای مدل به‌علت وجود عدم قطعیت پارامترهایی که به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری در میدان نیستند، مشکل است؛ بنابراین واسنجی مدل برای بهبود عملکرد مدل لازم است (Kumar et al., 2015). یکی از مدل‌ها برای شبیه‌سازی بارش رواناب، مدل RRL است. بسته نرم‌افزاری RRL توسط موسسه CRCCH در استرالیا طراحی شده است و شامل مجموعه‌ای از مدل‌های یکپارچه و مفهومی مانند SACRAMENTO، AWBM، SIMHYD، SMAR و TANK است که تنها از سه ورودی (بارش، تبخیر و تعرق و دبی) برای شبیه‌سازی رواناب خروجی حوضه استفاده می‌کند. از این رو در این پژوهش این روش به‌عنوان ابزار پیش‌بینی جریان هیدرولوژی ارزیابی شده است.

در این زمینه تاکنون تحقیقات مختلفی صورت گرفته است که می‌توان به سلمانی و همکاران (۱۳۹۲) برای بررسی کارایی مدل بارش رواناب در حوزه آبخیز آرازکوسه‌ی گرگان رود استان گلستان در سال‌های ۱۹۹۵-۱۹۸۴ از مدل‌های SACRAMENTO، AWBM و TANK استفاده کردند، اشاره کرد. ایشان به این نتیجه رسیدند که مدل‌های مذکور مقادیر کمینه و متوسط را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کنند، اما شبیه‌سازی چندان خوبی را از مقادیر حداکثر ارائه نکردند. مدل SACRAMENTO با دقت ۰/۶۷۷ در مرحله واسنجی و ۰/۶۶۹ در مرحله اعتبار سنجی بهترین کارایی را نسبت به دو مدل دیگر داشت. روحانی و فراهی مقدم (۱۳۹۲) به بررسی دو مدل SIMHYD و TANK در حوزه آبخیز چهل چای از زیر حوضه‌های گرگان رود پرداختند و نتایج آماری و گرافیکی مدل، نشان‌دهنده کارایی بهتر SIMHYD نسبت به TANK بود. برای واسنجی و اعتبارسنجی از داده‌های روزانه دبی در دوره زمانی ۱۹۹۶ - ۱۹۹۲ و ۲۰۰۵ - ۲۰۰۲ استفاده شد. بهمنش و همکاران (۱۳۹۲) به مقایسه دو مدل AWBM و SIMHYD در حوزه آبخیز نازلو چای پرداختند. هدف از این تحقیق بهینه‌کردن پارامترهای مدل‌های انتخابی، تعیین رواناب ناشی از بارش و محاسبه جریان خروجی در دوره‌های زمانی مختلف در خروجی حوزه آبخیز نازلو چای و بررسی کارایی مدل‌ها در دوره آماری ۱۰ ساله (اول مهرماه سال ۱۳۷۶ تا ۳۱ شهریور ۱۳۸۶) بود. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مدل‌ها تطبیق قابل‌قبولی با شرایط منطقه مورد مطالعه دارند. رستمی خلج و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی مقایسه‌ای کارایی مدل‌های بارش رواناب AWBM، SACRAMENTO، SIMHYD، SMAR و TANK پرداختند. نتایج نشان داد که بهینه‌ساز جستجوی مستقیم در بین سایر بهینه‌سازها نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. مدل AWBM با ضریب ناش

- 1- Rainfall runoff library
- 2- Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology

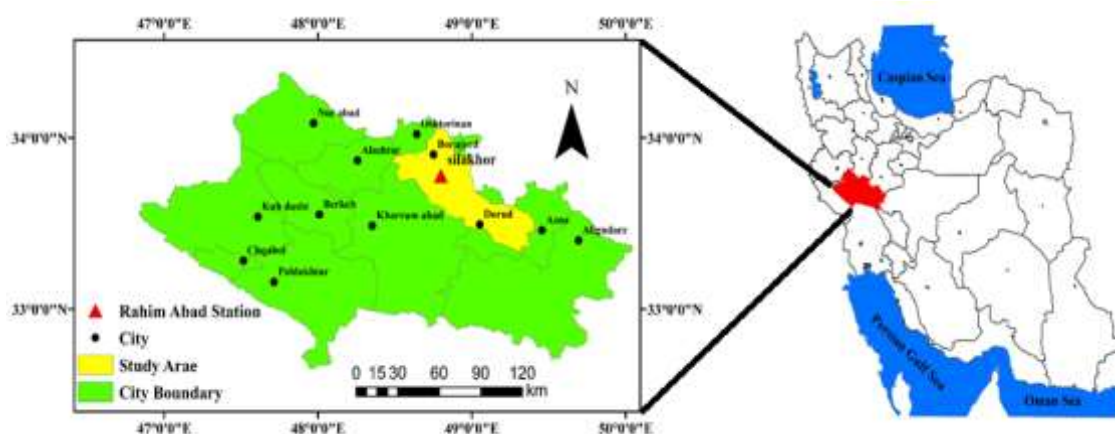
بودن ارتفاعات این محدوده، مسیل‌های واقع در آن دائمی بوده و زهکش اصلی این محدوده را رودخانه‌های سیلاخور، ماربره و تیره تشکیل می‌دهند به همین دلیل در این پژوهش به‌منظور شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز دشت سیلاخور، پنج مدل موجود در بسته نرم‌افزاری RRL موردبررسی قرار گرفت.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

دشت سیلاخور با وسعتی به‌اندازه ۸۱۹ کیلومتر مربع، بزرگ‌ترین زمین هموار استان لرستان در غرب ایران است. این دشت وسیع که شامل مساحت شهرستان‌های بروجرود و دورود نیز می‌باشد از قطب‌های مهم کشاورزی و باغداری منطقه به‌شمار می‌رود. کمترین ارتفاع محدوده ۱۴۳۷ متر، مربوط به بخش‌های خروجی حوضه و بیشترین ارتفاع محدوده ۳۸۴۵ متر از سطح دریا، مربوط به جنوب شرقی محدوده است. واحدهای فیزیوگرافی منطقه شامل دشت آبرفتی رودخانه‌ای در امتداد جنوب شرقی - شمال غربی و دشت‌های دامنه‌ای در دو طرف دشت‌های آبرفتی و در همان امتداد می‌باشند. شیب اراضی از حدود صفر درصد بر روی دشت آبرفتی رودخانه‌ای تا بیش از پنج درصد بر روی دشت‌های دامنه‌ای متغیر می‌باشد. خاک‌های منطقه بر روی رسوبات آبرفتی و آهکی ناشی از دو رودخانه تیره و کول آباد و همچنین رسوبات ناشی از فرسایش کوه‌های آهکی اطراف تشکیل شده‌اند. در این پژوهش برای شبیه‌سازی رواناب از آمار ایستگاه هیدرومتری، تبخیرسنجی و باران‌سنجی رحیم‌آباد در محدوده دشت سیلاخور برای بازه زمانی ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۸ استفاده شد. شکل ۱ و جدول ۱ موقعیت و مشخصات منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

پرداختند. نتایج نشان داد که نتایج آماری و گرافیکی واسنجی و صحت‌سنجی حاکی از عملکرد بهتر مدل SIMHYD نسبت به دو مدل دیگر با داشتن ضریب ناش ساتکلیف ۰/۵۷۵ و ۰/۷۳۱، تبیین ۰/۶۱ و ۰/۸۰ و مجذور میانگین مربعات خطا ۱/۰۳۳ و ۰/۸۲۹ به ترتیب در دوره واسنجی و صحت‌سنجی با کاربرد بهینه‌ساز واسنجی خودکار الگوریتم ژنتیک و انطباق گرافیکی خوب با مقادیر مشاهداتی است. زرین و همکاران (۱۳۹۲) به شبیه‌سازی رواناب خروجی در حوزه‌های آبخیز بدون آمار با استفاده از مدل بارش رواناب AWBM در استان سیستان و بلوچستان پرداختند. نتایج محاسبه‌شده توسط مدل در همه زیر حوضه‌ها نشان داد که مدل می‌تواند شبیه‌سازی قابل قبولی در حوضه‌های مورد مطالعه داشته باشد و با اطلاعات قابل‌دسترس، عکس‌العمل حوضه‌های بدون آمار یا دارای آمار کوتاه‌مدت را در مقابل بارش دریافتی شبیه‌سازی نماید و از قابلیت خوبی در پژوهش‌ها و مدل‌سازی بارش - رواناب در مناطق خشک و نیمه‌خشک برخوردار است. به‌دلیل ناهمگنی موجود در حوزه‌های آبخیز و غیرخطی بودن رفتارهای هیدرولوژیکی، شناخت کامل روابط موجود در آن‌ها، بسیار پیچیده و مشکل است. لذا در ارزیابی و بررسی این سیستم‌ها، اندازه‌گیری که قابل‌اعتمادترین معیار است به‌تنهایی کافی نیست در نتیجه مدل‌سازی صورت می‌گیرد. براین اساس کاربرد مدل‌های هیدرولوژیکی به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند بارش - رواناب و مدل‌های هیدرولیکی برای تحلیل جریان رواناب در رودخانه و بررسی نحوه گسترش آن سودمند می‌باشد. مدل‌های هیدرولوژیکی نمایش ساده‌شده‌ای از سیستم هیدرولوژی واقعی هستند که به مطالعه درباره کارکرد حوضه در واکنش به ورودی‌های گوناگون و فهم بهتر از فرآیندهای هیدرولوژی کمک می‌کنند. دشت سیلاخور در شمالی‌ترین قسمت حوضه آبریز کارون بزرگ قرار دارد. به‌علت ورود جریان‌های سطحی به این محدوده و همچنین وجود بارندگی کافی و برف‌گیر



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- مشخصات ایستگاه مورد مطالعه

ایستگاه	کد ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع
رحیم‌آباد	۲۶۱ - ۲۱	۵۲ - ۴۷ - ۴۸	۴۲ - ۴۶ - ۳۳	۱۴۹۰

ساختار مدل AWBM

AWBM یک مدل کامپیوتری بیلان آبی برای شبیه‌سازی بارش رواناب است که اولین بار توسط (Boughton, 2002) ارائه شد. این مدل یک مدل سطوح جزئی جریان سطحی اشباع است که از بارش روزانه و ساعتی تبخیر متوسط ماهانه و رواناب روزانه و ساعتی برای محاسبه‌ها استفاده می‌کند. مدل AWBM بر اساس 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 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. به‌این 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 (۱) به دست می‌آید:

$$\text{store}_{n+1} = \text{store}_n + \text{rain} - \text{evap} \quad (1)$$

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 عبارت‌اند 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 برآزش چندمتغیره خودکار استفاده می‌کند (Boughton, 2002).

ساختار مدل SACRAMENTO

مدل SACRAMENTO یک مدل پیوسته مفهومی و غیر توزیعی بارش رواناب است که با استفاده از داده‌های بارش و تبخیر، دبی را شبیه‌سازی می‌کند. شامل ۱۷ پارامتر است که توسط برناش و فرال در سال ۱۹۹۳ ارائه و توسط سیستم آب‌وهوای ملی برای پیش‌بینی سیلاب در ایالات‌متحده توسعه پیدا کرده است. پنج پارامتر بیانگر میزان رطوبت ذخیره شده در خاک، سه پارامتر بیانگر میزان جریان جانبی، سه پارامتر بیانگر میزان نفوذ از لایه‌های بالایی به لایه‌های پایینی ذخیره، دو پارامتر جهت محاسبه میزان رواناب مستقیم و سه پارامتر دیگر برای بیان تلفات سیستم است. در این مدل

از رطوبت خاک برای شبیه‌سازی بیلان آب استفاده می‌شود. بدیهی است که رطوبت خاک با افزایش بارش، افزایش و با افزایش تبخیر و تعرق و جریان آب به خارج مخزن، کاهش می‌یابد. اندازه رطوبت نسبی مخزن، بیانگر میزان بارش جذب شده و تبخیر تعرق صورت گرفته به‌صورت نسبی است. بارش مازاد و آب حاصل از حرکت جانبی ذخایر رطوبت خاک به رواناب تبدیل می‌گردد. پنج مخزن موجود در مدل مذکور عبارت‌اند از: مخزن منطقه بالایی کشش آب، مخزن منطقه پایینی آزاد اولیه، منطقه پایینی آب مازاد و مخازن کشش آب که بیان‌گر حجم آب نگه‌داشته شده توسط کشش سطحی در توده‌ی خاک است که این میزان آب تنها از طریق تبخیر و تعرق می‌تواند از این مخزن خارج گردد. حرکت آب درون خاک به‌صورت عمودی سبب ارتباط مخازن با یکدیگر می‌شود و اگر حرکت آب به‌صورت جریان زیر قشری (منطقه‌ی بالایی) و یا به‌صورت جریان پایه در منطقه پایینی باشد، آنگاه حرکت آب جانبی است (سلمانی و همکاران، ۱۳۹۲). حرکت آب در مخازن به این صورت است که ابتدا باران توسط مخزن منطقه بالایی کشش آب دریافت می‌شود و پس از پر شدن این مخزن، آب به مخزن منطقه بالایی آب آزاد می‌رود. این در حالی است که این مخزن هم‌زمان آب را برای مخازن پایین‌تر فراهم می‌کند. پس از پر شدن مخزن‌های کشش آب، آب وارد مخزن تنش آب می‌گردد. مدل ساکرامنتو سه جز جریان سطحی، زیر قشری و پایه را تولید می‌کند. در این مدل تبخیر و تعرق از مخزن تنش آب منطقه بالایی و پایینی مخزن آب آزاد بالایی و یا از آبراهه به‌صورت مستقیم صورت می‌گیرد. تبخیر از مخزن منطقه بالایی کشش آب، منطقه بالایی آب آزاد و منطقه پایینی کشش آب به ترتیب رخ می‌دهد. همچنین تبخیر ممکن است از مناطقی که به‌وسیله آبراهه‌ها، دریاچه‌ها و یا پوشش گیاهی پوشیده شده‌اند نیز رخ دهد. یکی دیگر از بخش‌های مهم مدل SACRAMENTO، فرآیند نفوذ است. اگر در مخزن منطقه بالایی آزاد افزایش ذخیره و یا در مخازن منطقه پایینی کاهش ذخیره صورت بگیرد، نفوذ افزایش می‌یابد. حد پایین نفوذ، میزان حداکثر نفوذ و میزان نفوذ واقعی از طریق رابطه‌های ۲، ۳ و ۴ به‌دست می‌آید (سلمانی و همکاران، ۱۳۹۲).

$$\text{Pbase} = (\text{LZFSM} * \text{LZFPM}) + (\text{LZFPM} * \text{LZPK}) \quad (2)$$

$$\text{PERC}_{\text{MAX}} = \text{Pbase} (1 + \text{ZPERC}) \quad (3)$$

$$\text{Perc} = \text{Pbase} [1 + \text{ZPERC} * (1 - \text{LZ}_{\text{RS}})^{\text{Rexp}}] * \text{UZ}_{\text{RS}} \quad (4)$$

ساختار مدل SIMHYD

انتهایی مخزن اول، معادله نفوذ مدل و خروجی انتهایی مخزن دوم و سوم بخش تراوش مدل است. خروجی کناری مخزن اول، دوم و سوم به ترتیب، رواناب میانی، رواناب زیر پایه و جریان پایه است. پارامترهای این مدل عبارتند از: ضرایب خروجی‌های کناری، ضرایب خروجی‌های انتهایی و ارتفاع خروجی‌های کناری. در این مدل واسنجی از طریق داده‌های مشاهداتی صورت می‌گیرد (روحانی و فراهانی مقدم، ۱۳۹۲). در این مدل $a_{11}, a_{12}, a_{31}, a_{41}$ طبق رابطه (۵) ضرایب خروجی‌های کناری هستند که برای به‌دست آوردن مجموع دبی در مخزن این ضرایب باهم جمع شده و دوباره با آب پایه جمع می‌شوند:

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

میزان تبخیر و تعرق در مخزن نیز از رابطه (۶) زیر به‌دست می‌آید:

$$ETA = ETP\{1 - \exp[-\alpha \sum_{x=1}^4 Cx] \quad (6)$$

که در این رابطه: ETA تبخیر و تعرق روزانه برحسب میلی‌متر، ETP تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه برحسب میلی‌متر، α ضریب تبخیر و تعرق که 0/1 است و C_x ارتفاع آب در هر مخزن است. در هر مخزن نیز نفوذ از رابطه (۷) حاصل می‌شود:

$$I_x = C_x B_x \quad (7)$$

که در این رابطه I_x میزان نفوذ برحسب میلی‌متر، C_x سطح آب هر تانک و B_x ضریب نفوذ هر مخزن است.

ساختار مدل SMAR

مدل SMAR نیز یک مدل مفهومی است که از تعدادی معادله تجربی و فرضیات حاکم بر آن استفاده می‌کند که حداقل از لحاظ فیزیکی قابل قبول باشد. این مدل از دو مدول تشکیل شده است. مدول تعادل غیرخطی آب مثل مقادیر رطوبت که از روابط پیوستگی قابل قبولی تشکیل شده است و مدول روندیابی که اثربخشی حوضه را با استفاده از روندیابی اجزای مختلف رواناب حاصل را در فواصل زمانی مختلف شبیه‌سازی می‌کند.

نتایج و بحث

در این پژوهش از بسته نرم‌افزاری ابزار RRL برای شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز دشت سیلاخور استفاده شد. دوره آماری ۲۰ ساله از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۸ به‌عنوان ورودی مدل انتخاب گردید. برای تمامی مدل‌های مفهومی از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۰ به‌عنوان دوره تعادل سنجی از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۳ به‌عنوان واسنجی و از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ به‌عنوان دوره صحت‌سنجی انتخاب شد.

این مدل یک مدل ساده، یکپارچه و مفهومی بارش رواناب است که در مطالعات تخمین رواناب، اثر تغییر اقلیم بر مقدار رواناب و آنالیز منطقه‌ای به‌کاربرده می‌شود. این مدل در واقع نسخه ساده‌شده‌ای از مدل HYDROLOG و MODHYDROLOG است که جریان روزانه را با استفاده از داده‌های بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل، شبیه‌سازی می‌کند. پارامترهای این مدل عبارتند از: ضریب جریان پایه، ضریب نفوذ، ضریب رواناب سطحی، کسر نفوذ، ظرفیت ذخیره قطع بارش، ضریب تغذیه و ظرفیت ذخیره رطوبت خاک (کمالی و مساح بوانی، ۱۳۸۹). در این مدل با در نظر گرفتن تبخیر ذخیره برگایی از سطح برگ، ابتدا ذخیره برگایی از سطح برگ مجدداً اشباع شده و سپس بارشی که از ظرفیت نفوذ زمین بیشتر است به رواناب سطحی تبدیل می‌شود. سپس تا زمانی که اشباع زمین به وقوع نپیوسته است، رواناب سطحی، از سطوح نفوذناپذیر و مناطقی که اشباع شده‌اند، صورت می‌گیرد. بارشی که از طریق خاک نفوذ یافته است، با در نظر گرفتن رطوبت قبلی خاک، آب را از طریق جریان زیر قشری و یا رواناب مازاد اشباع، به رودخانه انتقال می‌دهد و یا آب‌های زیرزمینی را تغذیه می‌کند. در این مدل، رواناب زیر قشری، تغذیه آب زیرزمینی و تبخیر و تعرق تابعی خطی از رطوبت خاک است و باقی‌مانده آب به مخزن رطوبت خاک منتقل می‌شود. البته باید توجه داشت که تبخیر و تعرق از مخزن، از تبخیر و تعرق کنترل‌شده اتمسفری بیشتر نباشد. در این مدل میزان رواناب از سه منبع نفوذ مازاد رواناب، آب زیر قشری و آب پایه تخمین زده می‌شود. همچنین مخزن رطوبت خاک ظرفیت محدودی دارد و پس از پر شدن آن، مازاد به مخزن زیرزمینی منتقل می‌گردد و آب پایه از مخزن زیرزمینی به‌صورت افت خطی از مخزن لحاظ می‌گردد (روحانی و فراهانی مقدم، ۱۳۹۲).

ساختار مدل TANK

مدل تانک، مدلی مفهومی است که داده‌های ورودی به آن، بارش، رواناب و تبخیر و تعرق روزانه است. این مدل مقادیر میانگین را برای کل حوضه لحاظ می‌کند و متشکل از چهار مخزن است. مخزن اول نشان‌دهنده رواناب سطحی، مخزن دوم نشان‌دهنده رواناب زیرسطحی، مخزن سوم نشان‌دهنده جریان زیرین و مخزن چهارم نشان‌دهنده جریان پایه است. در واقع هر مخزن نشان‌دهنده لایه‌ای از خاک است. این مدل بر این فرض استوار است که دبی و نفوذ تابعی از میزان آب ذخیره‌شده در خاک هستند. علاوه بر چهار مخزن مذکور، پنج خروجی کناری، سه خروجی انتهایی و چهار نقطه ارتفاعی خروجی کناری در این مدل وجود دارد. در این مدل اگر سطح آب هر مخزن از ارتفاع خروجی کناری بالاتر قرار بگیرد، رواناب ایجاد می‌شود. خروجی

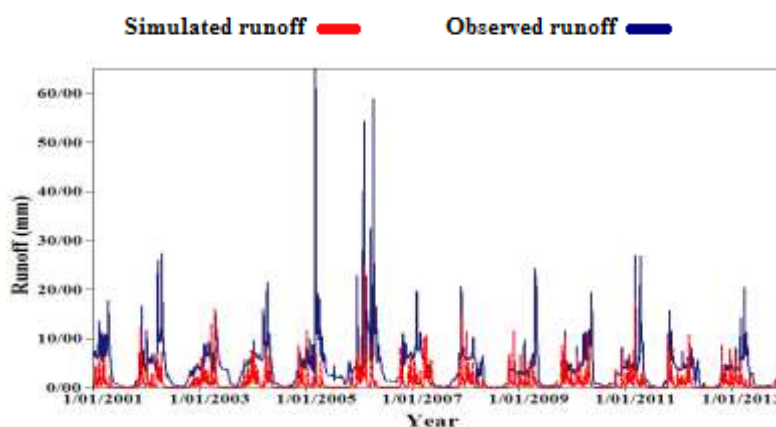
مدل AWBM

جزو پارامترهای حساس مدل می‌باشند. نمایه گرافیکی رواناب مشاهده‌شده و محاسبه‌شده حاصل از مدل AWBM در طی دوره واسنجی و صحت‌سنجی در شکل ۲ ارائه‌شده است. طبق شکل ۲ بین رواناب مشاهده‌ای و شبه‌سازی‌شده همبستگی زیادی وجود ندارد و در کل مدل AWBM مقادیر حداقلی را به‌خوبی شبه‌سازی کرد ولی در شبه‌سازی مقادیر حداکثری ناکارآمد بود. ضریب ناش - ساتکلیف برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۵۱ و ۰/۴۷ است.

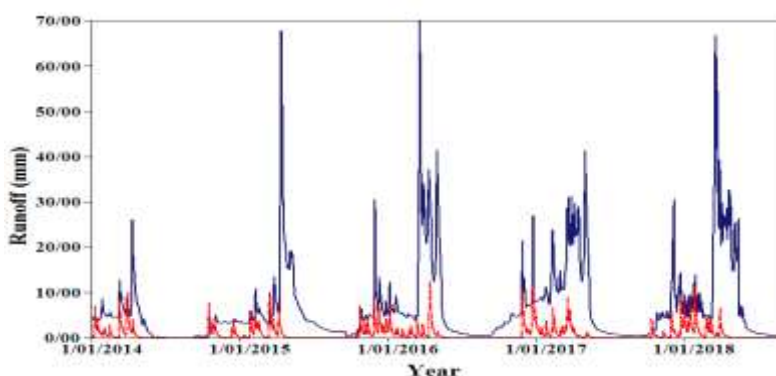
برای تعیین میزان کارایی مدل در شبه‌سازی جریان روزانه از معیار ناش - ساتکلیف استفاده‌شده است و برای بهینه کردن مقادیر پارامترهای مؤثر در مدل AWBM بهینه‌ساز جست‌وجوی مستقیم استفاده شد. پارامترهای بهینه‌سازی شده مدل AWBM در جدول ۲ ارائه‌شده است. طبق جدول ۲ مقدار بهینه پارامتر ضریب بازگشت جریان سطحی روزانه نزدیک به صفر شد و نشان‌دهنده حساسیت کم این پارامتر در کنترل سیستم مدل است. سایر پارامترهای این مدل

جدول ۲- مقادیر اولیه، دامنه تغییرات و بهینه‌شده پارامترهای مختلف مدل AWBM

پارامتر	مقدار اولیه	دامنه تغییرات	مقدار بهینه
A1 (ذخیره سطحی اول)	۰/۱۳۴	۰ - ۱	۰/۲۲
A2 (ذخیره سطحی دوم)	۰/۴۳۳	۰ - ۱	۰/۳۱
BFI (شاخص جریان پایه)	۰/۳۵۰	۰ - ۵۰	۰/۶۵
C1 (ظرفیت نگهداشت سطحی اول)	۷	۰ - ۵۰	۸/۴۱
C2 (ظرفیت نگهداشت سطحی دوم)	۷۰	۰ - ۲۰۰	۱۲۲/۷۴
C3 (ظرفیت نگهداشت سطحی سوم)	۰/۱۵۰	۰ - ۵۰۰	۲۹۹/۶۶
KBase (ضریب بازگشت جریان پایه روزانه)	۰/۳۵	۰ - ۱	۰/۸۷
KSurf (ضریب بازگشت جریان سطحی روزانه)	۰/۹۵	۰ - ۱	۰/۰۳



الف) واسنجی



ب) صحت سنجی

شکل ۲- رواناب مشاهده‌شده و شبه‌سازی‌شده برای مدل AWBM

مدل SACRAMENTO

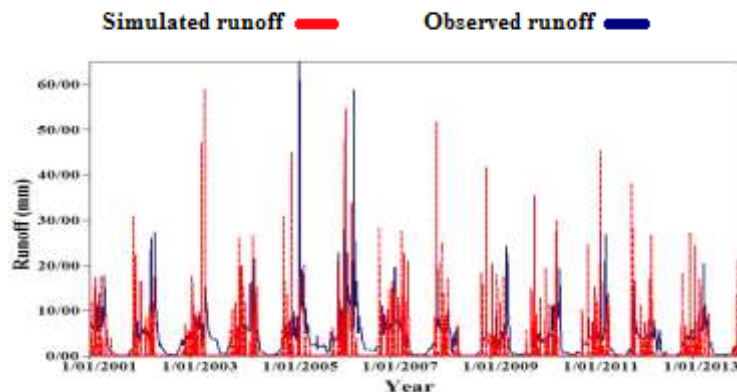
برای میزان کارایی مدل در شبیه‌سازی جریان روزانه از معیار ناش- ساتکلیف استفاده شده است، برای بررسی کارایی و صحت مدل‌ها، در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، ناش-ساتکلیف محاسبه شد. برای بهینه کردن مقادیر پارامترهای مؤثر در مدل SACRAMENTO الگوریتم ژنتیک استفاده شد. پارامترهای بهینه‌سازی شده مدل SACRAMENTO در جدول ۳ ارائه شده است. طبق جدول ۳ مقادیر بهینه پارامترهای کسری که به‌طور معمول توسط آبراهه‌ها، دریاچه‌ها و پوشش گیاهی پوشیده شده است و حجم جریانی که می‌تواند توسط مواد متخلخل در بستر جریان منتقل شود صفر شد که نشان‌دهنده عدم حساسیت این پارامترها در مدل در این حوضه است. سایر پارامترهای این مدل جز پارامترهای حساس مدل می‌باشند. نمایه گرافیکی رواناب مشاهده شده و محاسبه شده حاصل از مدل SACRAMENTO در طی دوره واسنجی و صحت‌سنجی در شکل (۳) ارائه شده است. طبق شکل ۳ بین رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده تا حدودی همبستگی وجود دارد و در کل مدل SACRAMENTO مقادیر حداقلی را نتوانست به‌خوبی شبیه‌سازی کند. ضریب ناش-ساتکلیف برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۵۲ و ۰/۴۹ است.

مدل SIMHYD

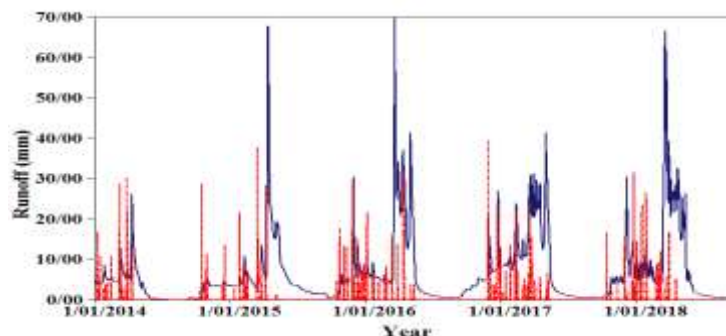
میزان کارایی مدل در شبیه‌سازی جریان روزانه از معیار ناش- ساتکلیف استفاده گردیده است، برای بررسی کارایی و صحت مدل‌ها، در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، ناش- ساتکلیف محاسبه گردید. برای بهینه کردن مقادیر پارامترهای مؤثر در مدل SIMHYD بهینه‌سازی جست‌وجوی مستقیم استفاده شد. پارامترهای بهینه‌سازی شده مدل SIMHYD در جدول ۴ ارائه شده است. طبق جدول ۴ مقادیر بهینه پارامتر ضریب جریان آب‌پایه، ضریب جریان زیر قشری در مدل SIMHYD با استفاده از بهینه‌سازی جست‌وجوی مستقیم نزدیک به صفر شد که نشان‌دهنده تأثیر بسیار کم این پارامتر در کنترل سیستم مدل است. سایر پارامترهای این مدل جزء پارامترهای حساس مدل می‌باشند. نمایه گرافیکی رواناب مشاهده شده و محاسبه شده حاصل از مدل SIMHYD در طی دوره واسنجی و صحت‌سنجی در شکل ۴ ارائه شده است. طبق شکل ۴ بین رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده همبستگی خوبی وجود دارد و در کل مدل SIMHYD توانست شبیه‌سازی خوبی از رواناب حوضه داشته باشد. ضریب ناش-ساتکلیف برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۷۰ و ۰/۶۸ است.

جدول ۳- مقادیر اولیه، دامنه تغییرات و بهینه‌شده پارامترهای مختلف مدل SACRAMENTO

پارامتر	مقدار اولیه	دامنه تغییرات	مقدار بهینه
Adimp (بخش اضافی PCTIM که توسعه‌دهنده منطقه نفوذناپذیر تحت شرایط اشباع خاک است)	۰/۰۱	۰ - ۱	۰/۰۳
Lzfp (حداکثر آب آزاد اولیه منطقه پایینی)	۴۰	۰ - ۵۰	۳۳/۳۶
Lzfs (حداکثر آب مازاد آزاد منطقه پایینی)	۲۳	۰ - ۵۰	۱۹/۲۰
Lzpk (نسبتی از آب در LZFP که به‌عنوان جریان پایه روزانه تخلیه می‌شود)	۰/۰۰۹	۰ - ۱	۰/۰۶
Lzsk (نسبتی از آب در LZFS که به‌عنوان جریان پایه روزانه تخلیه می‌شود)	۰/۰۴۳	۰ - ۱	۰/۰۲
Lztw (حداکثر کشش آب منطقه پایینی)	۱۳۰	۰ - ۴۰۰	۱۱۱/۲۸
Pctim (بخش نفوذناپذیر حوضه که به تولید رواناب مستقیم منجر می‌شود)	۰/۰۱	۰ - ۱	۰/۰۵
Pfree (حداقل سهم نفوذ آب از منطقه بالایی به منطقه پایینی برای تغذیه مخزن‌های آب آزاد منطقه پایینی)	۰/۰۶۳	۰ - ۱	۰/۶۶
Rexp (توان تعیین‌کننده نرخ تغییرات نفوذ با تغییر ذخیره‌سازی آب منطقه پایینی)	۱	۰ - ۳	۱/۰۱
Rserv (کسری از آب آزاد منطقه پایینی که برای نفوذ موجود است)	۰/۰۱	۰ - ۱	۰
Sarva (کسری که به‌طور معمول توسط آبراهه‌ها، دریاچه‌ها و پوشش گیاهی پوشیده شده است)	۰	۰ - ۱	۰/۲
Side (کسری از جریان پایه مشاهده‌شده‌ای که حوضه را به‌عنوان جریان آب‌های زیرزمینی ترک می‌کند)	۰/۰۰۱	۰ - ۱	۰
Uzfw (حداکثر آب آزاد منطقه فوقانی)	۴۰	۰ - ۸۰	۶۹/۵۵
Uzk (نسبتی از آب در UZFW که به‌عنوان جریان زیر قشری روزانه تخلیه می‌شود)	۰/۲۴۵	۰ - ۱	۰/۰۲
Uztw (حداکثر کشش آب منطقه بالایی)	۵۰	۰ - ۱۰۰	۵۱/۲۴
Zperc (فاکتوری که به‌منظور تعریف حداکثر نرخ نفوذ به کار می‌رود)	۴۰	۰ - ۸۰	۶۶/۵۸



الف) واسنجی



ب) صحت سنجی

شکل ۳- رواناب مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده برای مدل SACRAMENTO

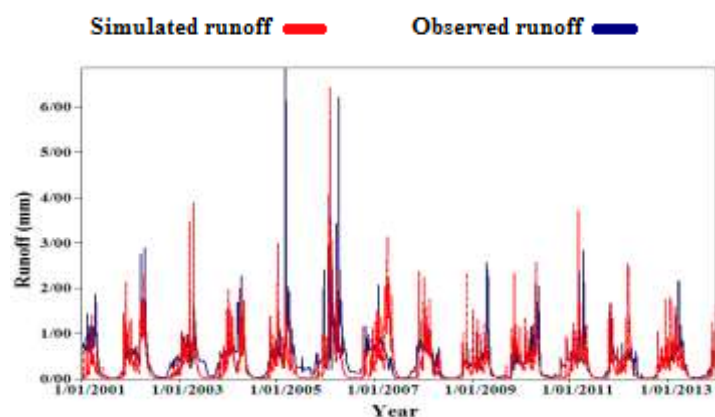
جدول ۴- مقادیر اولیه، دامنه تغییرات و بهینه‌شده پارامترهای مختلف مدل SIMHYD

پارامتر	مقدار اولیه	دامنه تغییرات	مقدار بهینه
ضریب جریان آب پایه	۰/۳	۱ - ۰	۰/۰۴۴
آستانه نفوذناپذیری	۱	۵ - ۰	۰/۸۸
ضریب نفوذ	۲۰۰	۴۰۰ - ۰	۹۸/۲۰
کسر نفوذ	۳	۱۰ - ۰	۱/۸۷
ضریب جریان زیر قشری	۰/۱	۱ - ۰	۰/۰۰۱
کسر پیشین	۰/۹	۱ - ۰	۰/۲۳
ظرفیت مخزن برگاب	۱/۵	۵ - ۰	۰/۱۱
ضریب تغذیه	۰/۲	۱ - ۰	۰/۵۵
ظرفیت ذخیره رطوبت خاک	۳۳۰	۵۰۰ - ۰	۱۳۵/۱۰

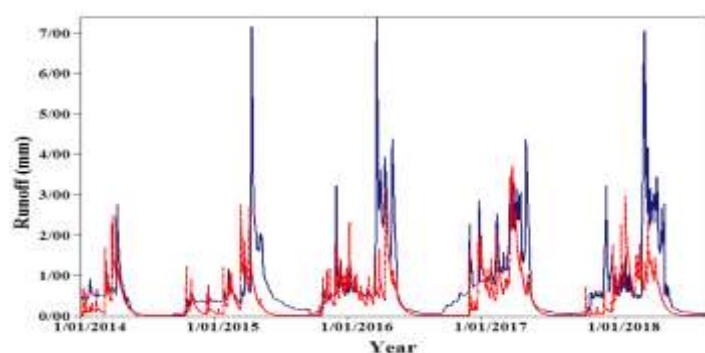
مدل TANK

برای تعیین میزان کارایی مدل در شبیه‌سازی جریان روزانه از معیار ناش- ساتکلیف استفاده شده است. برای بررسی کارایی و صحت مدل‌ها در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، ناش- ساتکلیف محاسبه شد. برای بهینه کردن مقادیر پارامترهای مؤثر در مدل TANK الگوریتم ژنتیک استفاده شد. پارامترهای بهینه‌سازی شده مدل TANK در جدول ۵ ارائه شده است. طبق جدول ۵ مقادیر بهینه پارامتر a12, b3, b1 در مدل TANK با استفاده از الگوریتم ژنتیک نزدیک به صفر شد که نشان‌دهنده حساسیت بسیار کم ضریب رواناب

دوم سطحی TANK اول، ضریب نفوذ TANK اول به TANK دوم، ضریب نفوذ TANK سوم به TANK چهارم است. سایر پارامترهای این مدل جزء پارامترهای حساس مدل می‌باشند. نمایه گرافیکی رواناب مشاهده‌شده و محاسبه‌شده حاصل از مدل TANK در طی دوره واسنجی و صحت‌سنجی در شکل ۵ ارائه شده است. طبق شکل ۵ بین رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده همبستگی خوبی وجود ندارد و در کل مدل TANK مقادیر حداقلی و حداکثری را نتوانست به خوبی شبیه‌سازی نماید. ضریب ناش-ساتکلیف برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۴۷ و ۰/۴۴ است.



الف) واسنجی

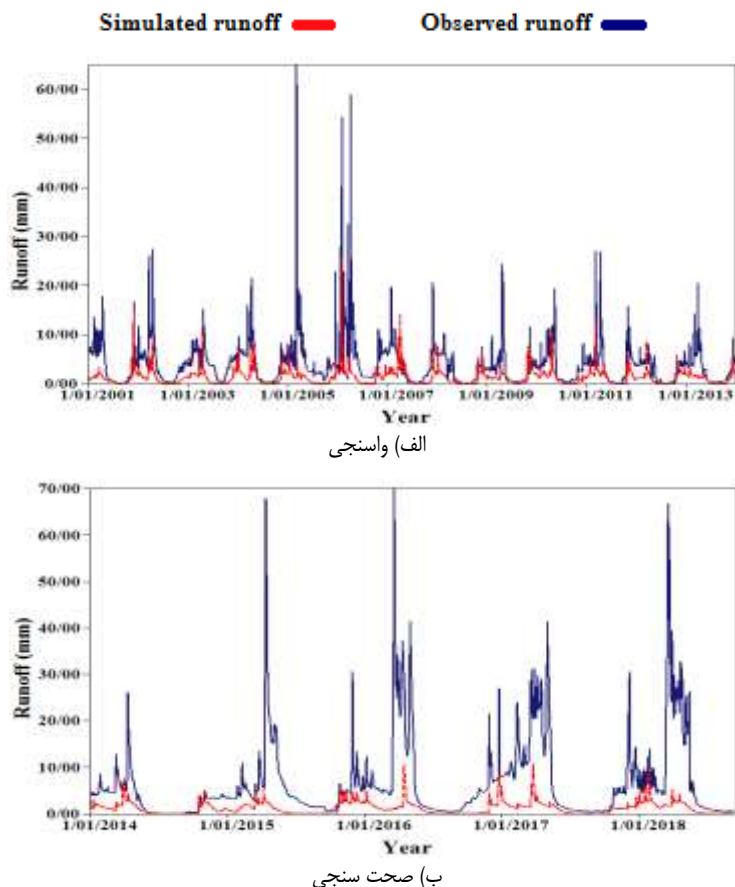


ب) صحت سنجی

شکل ۴- رواناب مشاهده شده و شبیه سازی شده برای مدل SIMHYD

جدول ۵- مقادیر اولیه، دامنه تغییرات و بهینه شده پارامترهای مختلف مدل TANK

پارامتر	مقدار اولیه	دامنه تغییرات	مقدار بهینه
ارتفاع رواناب سطحی تانک اول	۰	۰ - ۵۰۰	۳۴۴/۲۳
ارتفاع رواناب سطحی تانک اول	۰	۰ - ۳۰۰	۲۱۰/۱۰
ارتفاع رواناب سطحی تانک دوم	۰	۰ - ۱۰۰	۵۰/۳۳
ارتفاع رواناب سطحی تانک سوم	۰	۰ - ۱۰۰	۶۶/۱۰
ارتفاع رواناب سطحی تانک چهارم	۰	۰ - ۱۰۰	۷۷
ضریب رواناب اول سطحی تانک اول	۰/۲	۰ - ۱	۰/۲۸۵
ضریب رواناب دوم سطحی تانک اول	۰/۲	۰ - ۱	۰/۰۷۱
ضریب رواناب میانی دوم	۰/۲	۰ - ۱	۰/۴۲۱
ضریب رواناب زیرین تانک سوم	۰/۲	۰ - ۱	۰/۳۲۵
ضریب رواناب پایه تانک چهارم	۰/۲	۰ - ۱	۰/۲۱۰
ضریب رواناب مربوط به خروجی هر تانک	۰/۱	۰ - ۱	۰/۳
ضریب نفوذ تانک اول به تانک دوم	۰/۲	۰ - ۱	۰/۱۱
ضریب نفوذ تانک دوم به تانک سوم	۰/۲	۰ - ۱	۰/۳۲۶
ضریب نفوذ تانک سوم به تانک چهارم	۰/۲	۰ - ۱	۰/۰۶۱
سطح آب مخزن در تانک اول	۲۰	۰ - ۱۰۰	۱۳/۵۷
سطح آب مخزن در تانک دوم	۲۰	۰ - ۱۰۰	۴۰/۲۱
سطح آب مخزن در تانک سوم	۲۰	۰ - ۱۰۰	۱۶/۲۲
سطح آب مخزن در تانک چهارم	۲۰	۰ - ۱۰۰	۲۲/۱۰



شکل ۵- رواناب مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده برای مدل TANK

مدل SMAR

برای میزان کارایی مدل در شبیه‌سازی جریان روزانه از معیار ناش- ساتکلیف استفاده گردیده است، برای بررسی کارایی و صحت مدل‌ها، در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، ناش- ساتکلیف محاسبه گردید. برای بهینه‌کردن مقادیر پارامترهای مؤثر در مدل SMAR بهینه‌ساز جست‌وجوی مستقیم استفاده گردید. پارامترهای بهینه‌سازی شده مدل SMAR در جدول ۶ ارائه شده است. طبق جدول ۶ مقادیر بهینه پارامتر ضریب رواناب آب زیرزمینی، ضریب ذخیره‌سازی در مدل SMAR با استفاده از بهینه‌ساز جست‌وجوی مستقیم نزدیک به صفر شد که نشان‌دهنده بیانگر عدم حساسیت این پارامترها در مدل در این حوضه است. سایر پارامترهای این مدل جزء پارامترهای حساس مدل می‌باشند. نمایه گرافیکی رواناب مشاهده‌شده و محاسبه‌شده حاصل از مدل SMAR در طی دوره واسنجی و صحت‌سنجی در شکل ۶ ارائه شده است. طبق شکل ۶ بین رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده همبستگی نسبتاً خوبی وجود دارد و در کل مدل SMAR هم توانست به‌خوبی رواناب را شبیه‌سازی نماید. ضریب ناش- ساتکلیف برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۶۷ و ۰/۶۴ است. نتایج ارزیابی مدل‌ها در جدول ۷ آورده شده است. همان‌طور که

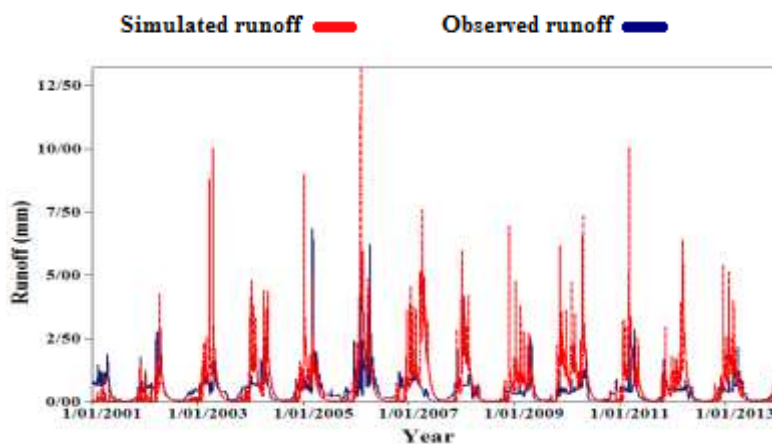
مشاهده می‌شود ضریب RMSE، ضریب همبستگی و ضریب ناش- ساتکلیف برای مدل AWBM در دوره واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۵۱، ۰/۴۷/۵۳، ۰/۰۴۷ و ۰/۵۱ است که نشان‌دهنده این است که مدل نتوانسته به‌خوبی الگوی رواناب حوضه را شبیه‌سازی نماید. برای مدل SACRAMENTO ضریب RMSE، ضریب همبستگی و ضریب ناش- ساتکلیف در دوره واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۵۶، ۰/۵۲، ۰/۵۵، ۰/۴۶، ۰/۴۹ و ۰/۵۴ که نشان‌دهنده این است که به‌خوبی نتوانسته است الگوی رواناب حوضه را شبیه‌سازی نماید. ضریب RMSE، ضریب همبستگی و ضریب ناش- ساتکلیف در دوره واسنجی و صحت‌سنجی برای مدل SIMHYD به ترتیب ۰/۷۷، ۰/۷۰، ۰/۷۴، ۰/۶۱، ۰/۶۸، ۰/۷۰ است که نشان‌دهنده این است که مدل نتوانسته است به‌خوبی رواناب حوضه را شبیه‌سازی نماید اما در مدل TANK ضریب RMSE، ضریب همبستگی و ضریب ناش- ساتکلیف برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۴۸، ۰/۴۷، ۰/۴۴، ۰/۴۲، ۰/۴۴ و ۰/۴۴ است که نشان‌دهنده این است که مدل در شبیه‌سازی رواناب حوضه ناتوان بوده است. هم‌چنین مدل SMAR برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی ضریب RMSE، ضریب همبستگی و ضریب ناش-

SIMHYD به ترتیب ۰/۷۴ و ۰/۷۰ برای دوره واسنجی و صحت سنجی که نشان‌دهنده تطابق بهتر رواناب شبیه‌سازی نسبت به سایر مدل‌ها در دوره واسنجی و صحت‌سنجی است.

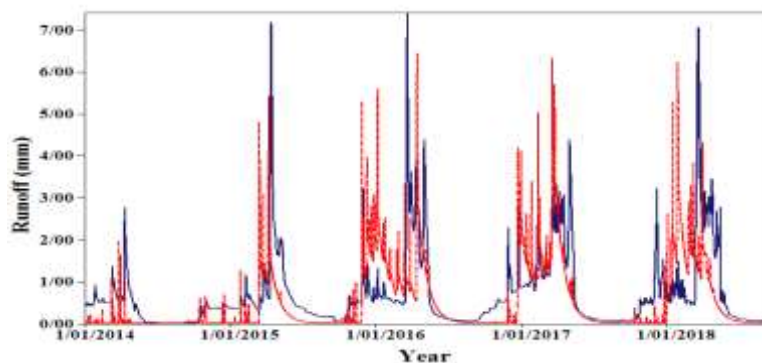
سانکلیم به ترتیب ۰/۶۷، ۰/۶۹، ۰/۵۸، ۰/۶۴ و ۰/۶۶ است که نشان‌دهنده این است که تا حدودی توانسته رواناب حوضه را شبیه‌سازی نماید. بیشترین ضریب همبستگی مربوط به مدل

جدول ۶- مقادیر اولیه، دامنه تغییرات و بهینه‌شده پارامترهای مختلف مدل SMAR

پارامتر	مقدار اولیه	دامنه تغییرات	مقدار بهینه
میزان تبخیر آب زیرزمینی (C)	۰	۰ - ۱	۰/۱۱
ضریب رواناب آب زیرزمینی (G)	۰	۰ - ۱	۰/۰۳
نسبت رواناب مستقیم (H)	۰	۰ - ۱	۰/۶۳
ضریب ذخیره‌سازی	۰	۰ - ۱	۰/۰۳
مسیریابی خطی U.H (N)	۰	۱ - ۶	۱/۲۳
مسیریابی خطی $U.H.N * K = NK$	۱	۰/۰۱ - ۱	۰/۵۲
ظرفیت ذخیره برگابی	۱	۰ - ۱	۰/۶۶
میزان نفوذ (Y)	۰	۰ - ۵۰۰۰	۴۲۳/۲۵
عمق ذخیره‌سازی رطوبت خاک (Z)	۲۰۰	۰ - ۵۰۰۰	۳۳۴/۳۶



الف) واسنجی



ب) صحت سنجی

شکل ۶- رواناب مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده برای مدل SMAR

جدول ۷- ضرایب آماری ارزیابی دقت مدل‌های مختلف در شبیه‌سازی رواناب روزانه در طی دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی

مدل	واسنجی			صحت‌سنجی		
	R ²	NS	RMSE	R ²	NS	RMSE
AWBM	۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۵۳	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۵۱
SACRAMENTO	۰/۵۶	۰/۵۲	۰/۵۵	۰/۴۶	۰/۴۹	۰/۵۴
SIMHYD	۰/۷۷	۰/۷۰	۰/۷۴	۰/۶۱	۰/۶۸	۰/۷۰
TANK	۰/۴۸	۰/۴۷	۰/۴	۰/۴۲	۰/۴۴	۰/۴۴
SMAR	۰/۶۱	۰/۶۷	۰/۶۹	۰/۵۸	۰/۶۴	۰/۶۶

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از بسته نرم‌افزاری RRL برای شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز دشت سیلاخور برای ایستگاه رحیم‌آباد استفاده شده است، این نرم‌افزار شامل پنج مدل بارش رواناب که عبارتند از: AWBM, SACRAMENTO, SIMHYD, TANK و SMAR. طول دوره آماری از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۸ انتخاب گردید. ۷۰ درصد داده‌ها برای واسنجی و ۳۰ درصد داده‌ها برای صحت‌سنجی در نظر گرفته شد. برای بهینه‌کردن مقادیر پارامترهای مؤثر از دو روش بهینه‌ساز جست‌وجوی مستقیم و الگوریتم ژنتیک استفاده شد. با توجه به عملکرد مدل‌ها، مدل SIMHYD با ضریب ناش - ساتکلیف ۰/۷۰ برای دوره واسنجی و ۰/۶۸ برای دوره صحت‌سنجی نسبت به سایر مدل‌ها توانایی بهتری در شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز دشت سیلاخور دارد. همچنین مدل SMAR هم با ضریب ناش - ساتکلیف ۰/۶۷ برای دوره واسنجی و ۰/۶۴ برای دوره صحت‌سنجی نسبتاً توانست شبیه‌سازی خوبی از رواناب حوزه مورد مطالعه داشته باشد. می‌توان گفت که مدل SIMHYD بهترین کارایی را در شبیه‌سازی رواناب در دوره واسنجی و صحت‌سنجی نسبت به سایر مدل‌ها داشت که با نتایج دست‌چندی و همکاران (۱۳۹۸) و روحانی و فراهانی مقدم (۱۳۹۲) و محمدی وند (۱۳۹۸) مطابقت دارد. مدل TANK با ضریب ناش - ساتکلیف ۰/۴۷ برای دوره واسنجی و ۰/۴۴ برای دوره صحت‌سنجی کمترین کارایی را بین مدل‌ها برای شبیه‌سازی رواناب در حوزه مورد مطالعه داشت. همچنین بررسی‌ها نشان داد که روش بهینه‌ساز جست‌وجوی مستقیم نسبت به سایر بهینه‌سازها بهترین کارایی را در منطقه مورد مطالعه داشت که با نتایج محمدی قلعه‌نی و ابراهیمی (۱۳۹۱) و اودت و دنیس (۲۰۰۲) هم‌خوانی دارد. با توجه به هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های مفهومی برای شبیه‌سازی مقادیر پیشینه، توانایی لازم را ندارد که با نتایج رستمی خلیج و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت دارد و در اکثر مواقع مقادیر حداقلی را هم به خوبی شبیه‌سازی نمی‌کنند.

منابع

- بهمنش، ج.، جباری، آ.، منتصری، م.، و رضایی، ح. ۱۳۹۲. مقایسه مدل‌های AWBM و SIMHYD در مدل‌سازی بارش-رواناب (مطالعه موردی: حوضه آبریز نازلو چای)، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی. ۲۴: ۴-۱۶۸-۱۵۵.
- دست‌چندی، ف.، آذرخشی، م.، و بشیری، م. ۱۳۹۸. مقایسه کارایی مدل‌های هیدرولوژیکی (AWBM و SIMHYD) و شبکه عصبی (RBF و MLP) در شبیه‌سازی بارش-رواناب (مطالعه موردی: حوضه باراربه-نیشابور). علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۳: ۴۵-۱۱۷-۱۰۷.
- روحانی، ح.، و فراهانی مقدم، م. ۱۳۹۲. واسنجی خودکار دو مدل بارش-رواناب TANK و SIMHYD با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مرتع و آبخیزداری. ۶۶: ۴-۵۳۳-۵۲۱.
- رستمی خلیج، م.، مقدم‌نیا، ع.، سلمانی، ح.، و سپه‌وند، ع. ۱۳۹۵. بررسی مقایسه‌ای کارایی مدل‌های بارش رواناب AWBM, SACRAMENTO, SIMHYD, TANK و SMAR. اکوسیستم‌های طبیعی ایران. ۷: ۲۴-۶۳-۴۷.
- زرین، ه.، مقدم‌نیا، ع.، نام‌درست، ج.، و مساعدی، ا. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی رواناب خروجی در حوزه‌های آبخیز فاقد آمار با استفاده از مدل بارش-رواناب AWBM (مطالعه موردی: استان سیستان و بلوچستان). پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک. ۲۰: ۲-۲۰۸-۱۹۵.
- سلمانی، ح.، بهره‌مند، ع.، صابر چناری، ک.، و رستمی خلیج، م. ۱۳۹۲. ارزیابی کارایی مدل‌های بارش-رواناب AWBM, SACRAMENTO و TANK در شبیه‌سازی رواناب رودخانه‌ی ارازکوسه‌ی حوزه آبخیز گرگان رود استان گلستان، اکو هیدرولوژی. ۱: ۳-۲۲۱-۲۰۷.
- کمال، ع.، و مساح‌بوانی، ع. ۱۳۸۹. تأثیر تغییر و نوسانات اقلیمی بر رواناب حوضه با دخالت عدم قطعیت دو مدل هیدرولوژی. آب‌وخاک. ۲۴: ۵-۹۳۱-۹۲۰.

- Dworak, F. 2011. Using the SACRAMENTO Soil Moisture Accounting Model to Improve Flood Frequency Estimates for Dam Safety, Soil Moisture Accounting Model, 1335-1347.
- Jaiswal, R.K. Ali, S. and Bharti, B. 2020. Comparative evaluation of conceptual and physical rainfall-runoff models. *Applied Water Science*, 10(1): 1-14.
- Kumar, A., Singh, R., Jena, P.P., Chatterjee, C., and Mishra, A. 2015. Identification of the best multi-model combination for simulating river discharge. *J Hydrol* 52(5): 313-325.
- Liu, Y.B., Batelaan, O., De Smedt, F., Poórová, J., and Velcická, L. 2005. Automated calibration applied to a GIS-based flood simulation model using PEST, in J. van Alphen, E. van Beek and M. Taal (eds.), *Floods, from Defence to Management*, Taylor-Francis Group, London, 317-326.
- Onyutha, C. 2016. Influence of hydrological model selection on simulation of moderate and extreme flow events: a case study of the Blue Nile basin. *Advances in Meteorology*, 2016.
- Wang, H., Wang, C.M., Wang, J.H., Zhou, Z. H. and Chen, Y. M. 2004. Theory of annual runoff evolution under natural-artificial dual mode and case study rivers, Wuding River loosen in the middle Yellow River. *Journal of Science in China Series E-Engineering and Materials Science*. 47, 51-50.
- Yu, B. and Zhu, Z. 2015. A comparative assessment of AWBM and SimHyd for forested watersheds. *Hydrological sciences journal*. 60(8): 1200 - 1212.
- گودرزی، م، ذهبیون، ب، مساح بوانی، ع، و کمال، ع. ۱۳۹۱. مقایسه عملکرد سه مدل هیدرولوژی SWAT، IHACRES و SIMHYD در شبیه‌سازی رواناب حوضه قره‌سو. مدیریت آب و آبیاری. ۲: ۱: ۴۰ - ۲۵.
- محمدی قلعه‌نی، م، و ابراهیمی، ک. ۱۳۹۱. ارزیابی الگوریتم‌های جستجوی مستقیم و ژنتیک در بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام - یک سیلاب از کارون. مدیریت آب و آبیاری. ۲: ۲: ۱۲ - ۱.
- محمدی وند، م، عراقی نژاد، ش، ابراهیمی، ک، و مدرسی، ف. ۱۳۹۸. ارزیابی عملکرد مدل‌های Sacramento، AWBM و SimHyd در شبیه‌سازی رواناب حوضه امامه با استفاده از بهینه‌ساز واسنجی خودکار الگوریتم ژنتیک. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۰: ۷: ۱۷۶۹ - ۱۷۵۹.
- Audet, C. and Dennis Jr, J.E. 2002. Analysis of generalized pattern searches. *SIAM Journal on Optimization*, 13.3: 889-903.
- Aytek, A. Ace, M. and Alp, M. 2008. An application of artificial intelligence for rainfall-runoff modeling. *Journal of Earth System Science*, 117: 145-155.
- BARLOW, K. WEEKS, A. GITHUI, F. CHRISTY, B. AND CHENG, X. 2010. THE OVENS RIVER, NORTHERN VICTORIA APPLICATION PROJECT, CRC FOR CATCHMENT HYDROLOGY TECHNICAL REPORT, 75.
- Boughton, W. 2002. AWBM Catchment Water Balance Model. Calibration and Operation Manual: 30p.

Runoff Rainfall Simulation Using RRL Toolkit (Case Study: Rahim Abad Station-Silakhor Plain)

H. Younesi¹, H. Yousefi², A. Arshia³, Y. Yarahmadi^{4*}

Received: Apr.28, 2020

Accepted: May.24, 2020

Abstract

Estimation of runoff from atmospheric rainfall has a special importance in hydrology studies, watershed management and soil science water conservation. In order to efficiently manage the watershed, the need to investigate the efficiency of hydrological models is more effective. The software package RRL is designed to simulate the runoff relationships of the basin and consists of five sub-conceptual models. In this study, conceptual models of AWBM, SACRAMENTO, SIMHYD, SMAR and TANK were used for Silakhor plain watershed (Rahim Abad station). The daily data of precipitation, evaporation and discharge were used in the statistical period of 1998 to 2018. For all conceptual models, from 1998 to 2000, as a balance period, from 2001 to 2013 as calibration and from 2014 to 2018, it was selected as the verification period. In the SIMHYD model, the Nash-Sutcliffe coefficient in the Multi Pattern Search Start method in the calibration and validation stages were 0.70 and 0.68, respectively, which indicates the relative ability of this model to simulate runoff among other models. In the TANK model, calibration and validation using Genetic Algorithm, the Nash-Sutcliffe coefficient were 0.47 and 0.44, respectively, which had the lowest efficiency among the models. The results showed that in the different optimization methods, the Multi Pattern Search Start method provides better results.

Keywords: Genetic Algorithm, Runoff precipitation, RLL Toolkit, Optimization, Silakhor plain

1- Assistant Professor, Watershed Management Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Lorestan, Iran

2- Associate Professor, Department of Renewable Energy and Environment, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Iran

3- M.Sc. Student, Watershed Management Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Iran

4- Ph.D. Student in Watershed Science and Engineering, Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Iran

(* - Corresponding Author Email: Yazdan.yarahmadi@ut.ac.ir)