

مقایسه عملکرد دو مدل هیدرولوژیکی مفهومی یکپارچه در شبیه سازی رواناب در حوزه آبخیز کسلیان

روژین دلپسند^۱، ابولحسن فتح آبادی^{۲*}، حامد روحانی^۲، سید مرتضی سیدیان^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه گنبد کاووس (roozhindelpasand@gmail.com)

۲- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه گنبد کاووس (ahfathabadi@yahoo.com)

چکیده

ماهیت پیچیده طبیعت و ساده سازی مدل‌ها، لزوم بهره‌گیری از رویکردهای بهینه‌سازی خودکار را برای رسیدن به جواب‌های ایجاب می‌کند. مدل‌های مفهومی بسیاری وجود دارد که هر کدام دارای پارامترهایی هستند که با توجه به داده‌های موجود مورد محاسبه قرار می‌گیرند، تخمین دقیق این پارامترها یکی از عواملی است که زمینه‌ساز مطالعات و تحقیقات بعدی است. مقاله حاضر به مقایسه کارایی دو مدل هیدرولوژیکی Sacramento و SMAR به منظور شبیه‌سازی دبی روزانه رودخانه کسلیان می‌پردازد و با دو شاخص آماری NCH و RMSE عملکرد و کارایی این دو مدل مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی مدل‌ها در دو دوره‌ی واسنجی (۲۰۱۱-۲۰۰۹) و اعتبارسنجی (۲۰۱۲-۲۰۱۳) انجام شد. ارزیابی دقت مدل‌ها با شاخص‌های آماری ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب کارایی ناش ساتکلیف (E_{NS}) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آماری و نموداری نشان داد که مدل Sacramento با شاخص $E_{NS} = 0/64$ و $RMSE = 0/26$ در طی دوره واسنجی و با $E_{NS} = 0/43$ و $RMSE = 0/29$ نتایج بهتری را نسبت به SMAR نشان می‌دهد. همچنین مدل‌ها مقادیر کمینه و متوسط جریان را با دقت خوبی پیش‌بینی کرده‌اند اما با توجه به دبی‌های اوج، مدل‌های مورد نظر نمی‌توانند تمام پیک‌ها را به خوبی شبیه‌سازی کنند.

واژه‌های کلیدی: مدل هیدرولوژیکی، SMAR، Sacramento، بهینه‌سازی، رواناب.

مقدمه

مدل سازی حوضه به عنوان یک ابزار برای درک بهتر فرایندهای هیدرولوژیکی ارائه شده است (عربی و همکاران، ۲۰۰۶).^۱ مدل معرف ساده‌ای از کل سامانه و نمایانگر بخشی از واقعیت‌های موجود در یک سامانه است، به همین دلیل مدل‌های هیدرولوژیکی را می‌توان به عنوان یک ابزار مهم در مطالعه اقلیم و فرایندهای هیدرولوژیکی به کار می‌برند. (Dovonec, ۲۰۰۰). تشریح کمی چرخه‌ی هیدرولوژیکی بسیار پیچیده و تحت تاثیر عوامل مختلفی است که قطعیت ندارند. ماهیت پیچیده طبیعت و ساده‌سازی مدل‌ها، لزوم بهره‌گیری از رویکردهای بهینه‌سازی خودکار را برای رسیدن به جواب‌های ایجاب می‌کند. مدل‌های مفهومی بسیاری وجود دارد که هر کدام دارای پارامترهایی هستند که با توجه به داده‌های موجود مورد محاسبه قرار می‌گیرند، تخمین دقیق این پارامترها یکی از عواملی است که زمینه‌ساز مطالعات و تحقیقات بعدی است. هر چند این الگوریتم‌ها امکان دستیابی به بهینه مطلق را تضمین نمی‌کنند، اما با اطمینان بالایی به دسترسی به جواب بهینه امیدوار بود. (Bohrani و همکاران، ۲۰۰۰). در بسیاری از مسائل مهندسی، به دلیل پیچیده بودن نوع مسئله تحت بررسی و تابع اهداف و وجود چند نقطه بهینه موضعی و سراسری، روش‌های کلاسیک قادر به تفکیک آن‌ها و یافتن نقاط بهینه سراسری نیستند. در چند سال اخیر با ابداع روش‌های مبتنی بر محاسبات نرم که اغلب جستجو را بر اساس جمعیت اولیه انجام می‌دهند، می‌توان در مسائل بسیار پیچیده، پاسخ‌های تقریبی بسیار نزدیک به بهینه سراسری را پیدا کرد. دو الگوریتم معمول استفاده شده در واسنجی مدل‌های بارش-رواناب شامل الگوریتم تکامل رقابتی جوامع (SCE) و ژنتیک الگوریتم (GA) هستند. اگرچه آن‌ها در جستجوی کل فضای پارامتر خوب هستند، اما GAها با همبستگی نهایی مطلوب سراسری بهینه سازی پارامتر دارای مشکل هستند (Kuczara و همکاران، ۱۹۹۸). محققان زیادی توانایی و قدرت زیاد روش SCE را به‌ویژه در مدل‌های بارش رواناب به اثبات رسانده‌اند. از جمله آن می‌توان به پژوهش‌های (جعفرزاده و همکاران، ۱۳۹۵). با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT در حوزه آبخیز گرگانرود اشاره کرد. همچنین (قادری و همکاران، ۱۳۹۳). در تحقیقی بهینه‌سازی بهره‌برداری از سامانه چند مخزنی با استفاده از الگوریتم تکامل رقابتی جوامع (SCE) پرداختند که نتایج نشان‌دهنده عملکرد خوب الگوریتم SCE در بهره‌برداری بهینه است. نتایج (صادقی طیس و بیلندی، ۱۳۹۲) نشان داد که الگوریتم‌های PSO^۲ و SCE کارایی بهتری در تحلیل عدم قطعیت برآورد پارامترهای مدل بارش-رواناب دارد. (بهیان مطلق و همکاران، ۱۳۹۶) به منظور بررسی اثر خصوصیات مکانی حوزه آبخیز بر واسنجی وقایع تک رخدادی سیلاب از ناش ساتکلیف استفاده کردند که این تحقیق نشان داد این شاخص در دامنه مطلوبی برای شبیه‌سازی قرار دارد. (بیلندی و همکاران، ۱۳۹۶) برای ارزیابی مولفه‌های هیدرولوژیکی حوضه با کمک مدل مفهومی پیوسته بارش-رواناب شماره منحنی اصلاح‌شده ناش ساتکلیف استفاده کردند. (سلمانی و همکاران، ۱۳۹۳) طی ارزیابی کارایی مدل‌های بارش-رواناب Sacramento.AWBM و Tank در شبیه‌سازی رواناب رودخانه ارازکوسه حوزه آبخیز گرگانرود نتیجه گرفتند که مدل Sacramento دارای دقت بیشتری است. (روحانی و فراهی مقدم، ۱۳۹۱) طی تحقیقی در بهینه‌سازی دو مدل بارش-رواناب تانک و SIMHYD با استفاده از الگوریتم ژنتیک نتیجه گرفتند که کارایی مدل SIMHYD بهتر است. (استیون و همکاران، ۲۰۰۳)، طی تحقیقی روش‌های توسعه برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل مخزن را بررسی کردند، مطالعات بررسی کارایی روش‌های بهینه سازی نشان داد که الگوریتم مارکودرات برای تعیین پارامترهای مدل تانک مناسب است. (صادقی طیس و همکاران، ۱۳۹۳)، طی مطالعات خود به مقایسه و ارزیابی روش‌های بهینه‌سازی سراسری در تخمین پارامترهای مدل هیدرولوژیکی رواناب روزانه در حوزه آبریز کرج و لیف پرداختند، نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که روش‌های بهینه‌سازی مجموعه ذرات و تکامل تصادفی جوامع نسبت به روش‌های ترکیب روش‌های ژنتیک و مجموعه ذرات، جهش ترکیبی قورباغه و روش کرم شب تاب برتری دارد. (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۱) عملکرد مدل SWAT بر IHACRES و SIMHYD در شبیه‌سازی رواناب حوضه قره‌سو را کارا تر دانستند. (Kuczara و همکاران، ۲۰۱۷). به مقایسه الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیوتن و SCE برای واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی مفهومی پرداختند. مقاله حاضر به مقایسه کارایی دو مدل هیدرولوژیکی SMAR و Sacramento به منظور شبیه‌سازی دبی روزانه رودخانه کسلیان می‌پردازد و با به‌کارگیری شاخص آماری ناش ساتکلیف و RMSE عملکرد و کارایی این دو مدل مورد بررسی قرار می‌دهد.

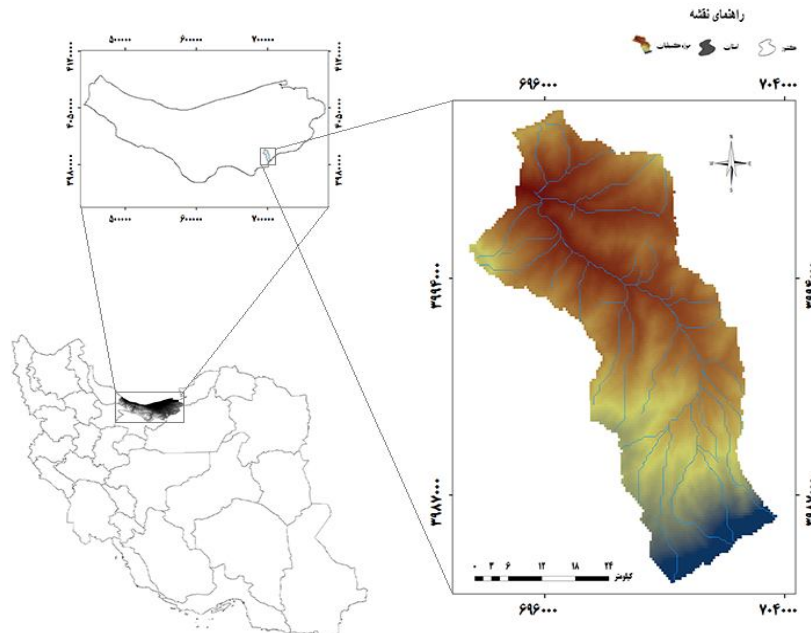
¹ Arabi et al.

² Particle swarm optimization

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز معرف کسلیان به مساحت ۶۶/۷۵ کیلومتر مربع و در دامنه های شمالی سلسله جبال البرز واقع است (شکل ۱). حوضه مذکور از زیرحوضه های آبخیز تالار است و در ارتفاعات زون مرکزی سلسله جبال البرز، در ۱۹ کیلومتری شهرستان قائم شهر در استان مازندران واقع است این آبخیز با توجه به شرایط طبیعی و آب و هوایی خود به عنوان معرف مناطق کوهستانی و جنگلی در نظر گرفته می شود. متوسط بارندگی منطقه ۷۹۱ میلی متر بوده و عمدتاً به صورت باران ریزش می نماید. اقلیم منطقه براساس روش آمبرژه نیمه مرطوب سرد است. حوضه آبیض کسلیان دارای پوشش غالب جنگلی بوده که به مرور زمان کاربری های مثل مرتع، مناطق روستایی و کشاورزی در کنار کاربری جنگلی قرار دارند. با توجه به فقدان بعضی داده های هیدرو اقلیمی سال های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۳ میلادی برای مدل سازی استفاده شد. به منظور واسنجی و اعتبار سنجی مدل های مورد استفاده، داده های مشاهداتی به دو قسمت واسنجی (۲۰۰۸ تا ۲۰۱۱) و اعتبار سنجی (۲۰۱۲-۲۰۱۳) تقسیم بندی شد.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز کسلیان در ایران

مدل های هیدرولوژیکی

در این تحقیق از دو مدل مفهومی - یکپارچه SMAR و Sacramento برای مدل سازی روزانه بارش - رواناب استفاده شد. مدل رطوبت خاک (SMAR) یک مدل ساده ی یکپارچه مفهومی بارش - رواناب روزانه، با در نظر گرفتن رطوبت خاک به عنوان موضوع مرکزی اش است. این مدل برآوردهای روزانه از رواناب سطحی، تخلیه ی آب زیرزمینی، تبخیر و تعرق و نشت از نیمرخ خاک را به طور کلی برای حوضه فراهم می کند. مدل SMAR شامل دو جزء به ترتیب، یک جزء بیلان آبی و یک جزء مسیریابی است. مدل SMAR شامل پنج پارامتر تعادل آب و چهار پارامتر مسیریابی است. مدل Sacramento یک مدل پیوسته مفهومی و غیر توزیعی بارش رواناب است. این مدل دارای ۱۶ پارامتر مختلف است که پنج پارامتر مشخص کننده ی اندازه رطوبت ذخیره شده در خاک، سه پارامتر محاسبه کننده میزان جریان جانبی، سه پارامتر محاسبه کننده میزان نفوذ آب از لایه های بالایی به لایه های پایینی ذخیره، دو پارامتر محاسبه کننده رواناب مستقیم است و سه پارامتر تلفات سامانه را محاسبه می کنند. این مدل از رطوبت خاک برای شبیه سازی بیلان آب در حوزه استفاده می کند.

معیارهای ارزیابی عملکرد مدلها

در این مطالعه برای ارزیابی نتایج از دو شاخص آماری متداول شامل RMSE و ضریب ناش- ساتکلیف استفاده شد. RMSE بین مقادیر یک تا بی نهایت را شامل می شود که این مقدار هرچه کمتر باشد بهینه سازی بهتر است. RMSE از $-\infty$ تا $+\infty$ بوده و هر چه شبیه سازی بهتر انجام گرفته باشد، مقدار آن به صفر تمایل دارد. تغییرات E_{NS} از $-\infty$ تا $+\infty$ بوده و هر چه شبیه سازی بهتر انجام گرفته باشد، مقدار آن به یک نزدیکتر است. از طریق روابط (۱) و (۲) می توانیم مقادیر RMSE و ناش ساتکلیف را محاسبه کنیم، که X و Y در این روابط نشان دهنده دبی مشاهداتی و برآوردی می باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - x_i)^2}{N}} \quad (1)$$

$$NASH = 1 - \frac{(y_i - x_i)^2}{(y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (2)$$

نتایج و بحث

دو مدل هیدرولوژیکی مورد مطالعه به وسیله الگوریتم بهینه سازی SCE به تعداد ۵۰۰ بار اجرا شد. پارامترهای بهینه محاسبه شده هر یک از دو مدل هیدرولوژیکی به کمک الگوریتم بهینه سازی در حوزه آبخیز کسلیان در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است. در جدول ۱ پارامترهای مدل SACRAMENTO نمایش داده شده است. که طبق این جدول، مقادیر بهینه ی بیشینه آب اولیه، شاخص تعیین سرعت، Resrv، Sarva، LZPK، LZSK و بخش غیرقابل نفوذ صفر یا نزدیک به صفر است که نشان دهنده ی تاثیر گذاری کم آن هاست. مقدار بهینه بیشینه آب آزاد منطقه نزدیک به حد بالا است که از تأثیر گذاری چشم گیر آن حکایت می کند. بیشینه تنش آب منطقه هم از عوامل تاثیر گذار می باشد. مقدار بهینه ی کمینه نفوذ از منطقه بالایی به پایینی مقدار بالایی دارد که نشان دهنده ی تاثیر گذاری بالایی دارد. بهینه سازی پارامترهای مدل SACRAMENTO نشان می دهد که با تغییر پارامترهای تاثیر گذار دبی اوج تغییر چشم گیری می کند. در جدول ۲ مقادیر بهینه پارامترهای مدل SMAR آورده شده است که طبق این جدول، مقادیر بهینه ی سهم مستقیم، از دست دادن ذخیره، H.U مسیریابی خطی، نرخ نفوذ و عمل ذخیره سازی رطوبت صفر یا نزدیک به صفر بوده که نشان دهنده ی تاثیر گذاری کم یا عدم تاثیر گذاری در بهینه سازی است. ضریب رواناب زیرزمینی یکی از پارامترهای اصلی تاثیر گذاری است. تبخیر زیرزمینی تا حدودی تاثیر گذار است. پارامتر مسیریابی خطی CU.H بسیار تاثیر گذار است. پارامتر EVAP حد بالا و بهینه آن با هم برابر بوده که نشان دهنده ی شبیه سازی کامل است. تغییر در پارامترهای تاثیر گذار در مدلها موجب تغییر در دبی اوج می شود. در جدول ۳ مقایسه عملکرد دو مدل ارائه شده است. طبق جدول ۳ مقدار RMSE برای مدل SACRAMENTO در دوره واسنجی برابر ۰/۲۶ و مقدار E_{NS} برابر ۰/۶۴ می باشد که نتایج بهتری را نسبت به اعتبارسنجی نشان می دهد. در ادامه شکل های ۲ و ۳ نمایش هیدروگراف مدلها و مقایسه میان میزان دبی برآوردی و دبی مشاهده شده می باشد. همان طور که در شکلها دیده می شود در مدل SACRAMENTO دبی برآوردی بهتر شبیه سازی شده است و نتایج بهتری را نشان می دهند. مطالعات (Wang و همکاران، ۲۰۰۶). (Vaze و همکاران، ۲۰۱۰). در زمینه استفاده از مدل SACRAMENTO هم خوانی دارد. (سلمانی و همکاران، ۱۳۹۳) طی تحقیقی نشان دادن که مدل SACRAMENTO برای دوره اعتبارسنجی نتایج بهتری را به دست می دهد. نتایج تحقیقات (Yapo و همکاران، ۱۹۹۶). نشان داد که مدل SACRAMENTO برای دوره واسنجی نتایج بهتری را به دست می دهد. نتایج آماری مطالعات (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۱) و (Wang و همکاران، ۲۰۰۶) نشان دهنده ی این امر است که شبیه سازی در دوره واسنجی دقت بیشتری نسبت به دوره اعتبارسنجی دارد.

جدول ۱- مقادیر محدوده پارامترهای مدل SACRAMENTO و مقادیر بهینه مدل با الگوریتم SCE

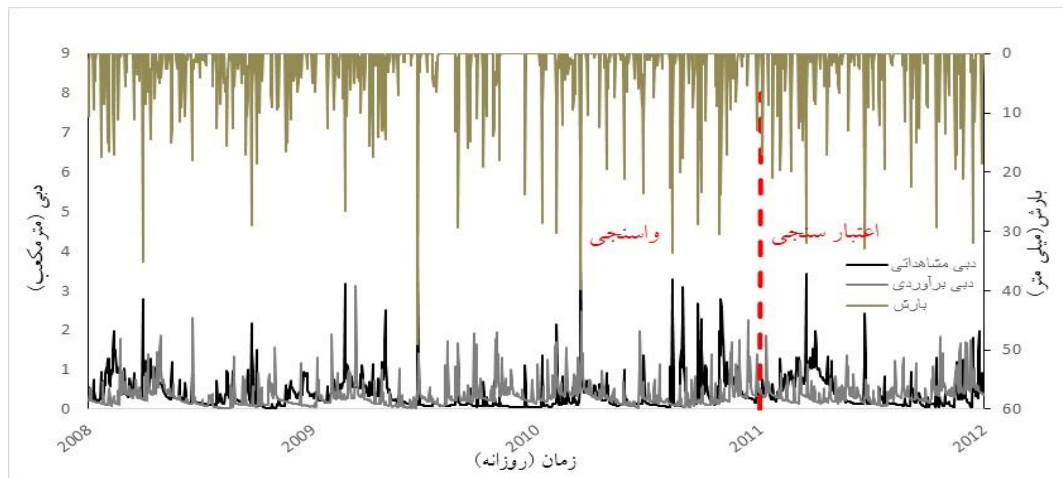
مقادیر بهینه مدل	حد پایین	حد بالا	توضیحات پارامترهای مدل	پارامترهای مدل
۰/۰۱	۰	۱	بخش اضافی که توسعه دهنده منطقه نفوذناپذیر تحت شرایط اشباع خاص	Adimp
۴۰	۰	۵۰	حداکثر آب آزاد اولیه منطقه پایینی	Lzfp
۲۳	۰	۵۰	حداکثر آب آزاد منطقه پایینی	Lzfs
۰/۰۰۹	۰	۱	نسبتی از آب در lzfp بصورت جریان پایه روزانه تخلیه می شود	Lzpk
۰/۰۴۳	۰	۱	نسبتی از آب در lzfs که به عنوان جریان پایه روزانه تخلیه می شود	Lzsk
۱۳۰	۰	۴۰۰	حداکثر کشش آب منطقه پایینی	Lzwm
۰/۰۱	۰	۱	بخش غیرقابل نفوذ وزه که به تولید رواناب مستقیم منجر می شود	Pctim
۰/۶۳	۰	۱	حداقل نفوذ از منطقه بالایی به منطقه پایینی	Pfree
۱	۰	۳	شاخص تعیین سرعت نفوذ	Rexp

جدول ۲- مقادیر محدوده پارامترهای مدل SMAR و مقادیر بهینه مدل با الگوریتم SCE

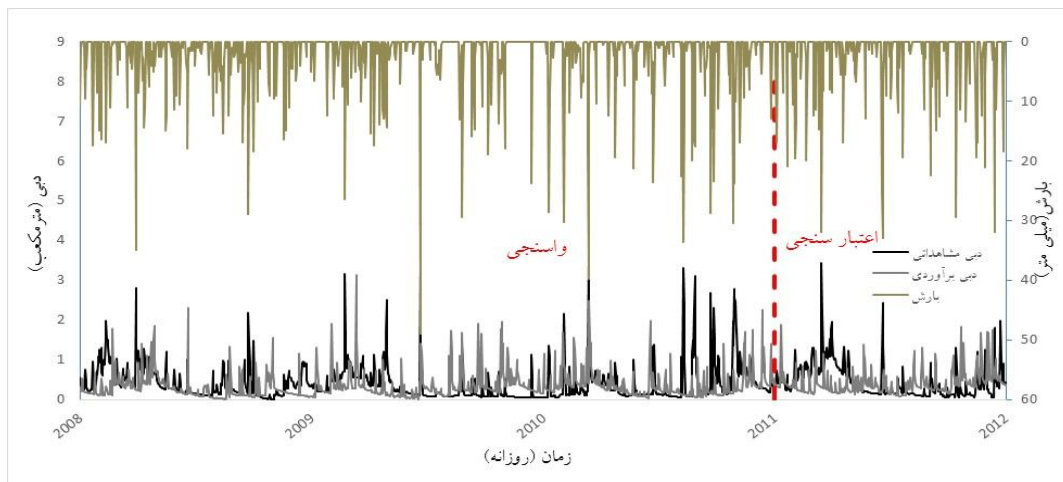
مقادیر بهینه	حد پایین	حد بالا	توضیحات پارامترهای مدل	پارامترهای مدل
۰	۰	۱	تبخیر زیرزمینی	C
۰	۰	۱	ضریب رواناب زیرزمینی	G
۰	۰	۱	سهم مستقیم از رواناب	H
۰	۰	۱	از دست دادن ذخیره	Kg
۱	۱	۶	مسیریابی خطی H.U	N
۱	۰/۱۰	۱	مسیریابی خطی CU.H	NK
۰	۰	۱	Evap پارامتر تبدیل	T
۰	۰	۵۰۰۰	نرخ نفوذ	Y
۲۰۰	۰	۵۰۰۰	عمل ذخیره سازی رطوبت	Z

جدول ۳- مقادیر شاخص های NCH و RMSE برای دو مدل SACRAMENTO و SMAR

اعتبارسنجی (۲۰۱۲-۲۰۱۳)		واسنجی (۲۰۰۹-۲۰۱۱)		مدل هیدرولوژیکی
E_{NS}	RMSE	E_{NS}	RMSE	
۰/۴۳	۰/۲۹	۰/۶۴	۰/۲۶	SACRAMENTO
۰/۴۳	۰/۲۹	۰/۴۷	۰/۳۲	SMAR



شکل ۲- مقادیر رواناب مشاهداتی و شبیه سازی شده برای دوره واسنجی و اعتبار سنجی برای مدل SACRAMENTO



شکل ۳- مقادیر رواناب مشاهداتی و شبیه سازی شده برای دوره واسنجی و اعتبار سنجی برای مدل SMAR.

نتیجه گیری

امروزه برای شبیه سازی بارش رواناب از مدل های هیدرولوژیکی استفاده می کنیم، هدف از آن مدیریت بهتر حوزه های آبخیز و شهری و کاهش خطرات و خسارات است. استفاده از چند مدل برای شبیه سازی دید بهتر و نتایج دقیق تری را در اختیار محققین می گذارد. در این مطالعه دو مدل یکپارچه مفهومی بارش-رواناب SACRAMENTO و SMAR در ایستگاه کسلیان در مقیاس روزانه واسنجی و اعتبارسنجی شدند که نتایج آن با توجه به نمایه های آماری ذکر شده، رضایت بخش بود. در بیشتر شبیه سازی ها مقدار دبی اوج به مقدار دبی مشاهده ای نزدیک است. برای ماههایی که درجه حرارت پایین است، مقدار دبی برآورد شده بیشتر از مقادیر مشاهداتی می باشد. نتایج نشان می دهند که در دوره واسنجی SACRAMENTO نتایج بهتری را به دست می دهد. استفاده از این مدل یا مدل های کامپیوتری دیگر به دلیل کاهش هزینه عملیات میدانی به ویژه به دلیل کاهش زمان مورد نیاز برای تحلیل مسائل، می تواند جزو راهکارهای ممکن به منظور ارتقای سطح مدیریت منابع آب و حفظ محیط زیست قلمداد شود. علاوه بر این، با استفاده از این ابزار این امکان برای پژوهشگران و مدیران اجرایی به وجود می آید تا سناریوهای مختلف مدیریتی را که امکان اجرای آن ها در زمان کوتاه و بدون صرف هزینه سنگین وجود ندارد مورد ارزیابی قرار داده و با تحلیل نتایج، بهترین تصمیم را اتخاذ کرد.

منابع

- بهیان مطلق، سودابه، پژوهش، مهدی، عبدالمهدی، خدایار، (۱۳۹۶)، بررسی اثر خصوصیات مکانی حوزه آبخیز بر واسنجی وقایع تک رخدادی سیلاب (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کوه سوخته)، مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۲۳، ص ۸۳-۶۷.
- سلمانی، حسن، بهره‌مند، عبدالرضا، صابرچناری، کاظم و رستمی خلج، محمد، (۱۳۹۳)، ارزیابی کارایی مدل‌های بارش- رواناب AWBM، Tank و Sacramento در شبیه‌سازی رواناب رودخانه آرازکوسه حوضه آبخیز گرگان‌رود، مجله اکوهیدرولوژی، دوره ۱، شماره ۳، ص-۲۰۷-۲۲۱.
- جعفرزاده، مریم‌السادت، روحانی، حامد، سلمانی، حسن و فتح‌آبادی ابوالحسن، (۱۳۹۵)، کاهش عدم قطعیت در یک مدل نیمه توزیعی با روش GLUE، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۲۳، شماره اول.
- روحانی، حامد و فراهانی مقدم، محسن، (۱۳۹۱)، واسنجی خودکار دو مدل بارش- رواناب تانک و SIMHYD با استفاده از الگوریتم ژنتیک، نشریه مرتع و آبخیزداری، دوره ۶۶، شماره ۴، ص ۵۲۱.
- صادقی طبس، صادق، پوررضا بیلندی، محسن و خزیمه‌نژاد، حسین، (۱۳۹۳)، مقایسه و ارزیابی روش‌های بهینه‌سازی سراسری در تخمین پارامترهای مدل هیدرولوژیکی رواناب روزانه، نشریه علوم مهندسی آبیاری، دوره ۸۳، شماره ۳، ص ۱۴۲-۱۲۹.
- صادقی طبس، صادق و بیلندی، پوررضا، محسن، (۱۳۹۲)، مقایسه‌ی روش‌های بهینه‌سازی فراکوشی در تحلیل عدم قطعیت پارامترهای مدل مفهومی بارش رواناب، مجله منابع طبیعی ایران، دوره ۶۸، شماره ۳، ص ۵۵۲-۵۳۳.
- قادری، کورش، زلفی، آناهیتا و بختیاری، بهرام، (۱۳۹۳)، بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم چند مخزنی با استفاده از الگوریتم تکامل رقابتی جوامع (SCE) (مطالعه موردی: حوضه کرخه)، نشریه مدیریت آب و آبیاری، دوره ۴، شماره ۲، ص ۲۲۸-۱۲۵.
- گلنارکار، ثریا، پوررضا بیلندی، محسن، خاشعی سیوکی، عباس و امیرآبادی‌زاده، مهدی، (۱۳۹۶)، ارزیابی مولفه‌های هیدرولوژیکی حوضه با کمک مدل مفهومی پیوسته بارش- رواناب شماره منحنی اصلاح شده، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، شماره اول، جلد ۲۴.
- گودرزی، محمدرضا، ذهبیون، باقر، مساح بوانی، علی‌رضا و کمال، علی رضا، (۱۳۹۱)، مقایسه عملکرد مدل SWAT بر IHACRES و SIMHYD در شبیه‌سازی رواناب حوضه قره‌سو، مجله مدیریت آب و آبیاری، دوره ۲، شماره ۱، ص ۴۰-۲۵.
- Arabi, M., Govindaraju, R., S., Sophocleous, M., & Koelliker, J. K., (2006), Use of distributed models for watershed management: case studies, Watershed models. Boca Raton, FL: Taylor and Francis.
- Borhani Darian, A.R., & Farahmandfar, Z., (2011), Calibration of Rainfall-runoff models using MBO algorithm, The Iranian Society of Irrigation and Water Engineering, 1(4), 60-71.
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V.K., (1993), Shuffled Complex Evolution approach for effective and efficient global optimization, Journal of Optimization Theory and Application, 76(3), 501-521.
- Dovonec, E., (2000), A physically based distributed hydrologic model, M.Sc, Thesis. The Pennsylvania State University, 209 pp.
- Kuczara, G., and Parent, E., (1998), Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: The Metropolis algorithm, Journal of Hydrology, 211, 69-85.
- Kuczera, G., Kavetski, D., (2017), Comparison of newton-type and SCE optimisation algorithms for the calibration of conceptual hydrological models, Australasian Journal of Water Resource, 20(2), 169-176.
- Singh VP., Woolhiser DA., (2002), Mathematical modeling of watershed hydrology, J Hydrol Eng; 7(4): 270-92.
- Vaze, J., Chiew, F.H.S., Perraud, J.M., Viney, N., Post, D., Teng, J., Wang, B. & Goswami, M., (2010), Rainfall-runoff modeling across southeast Australia: Datasets, models and results, Australian Journal of Water Resources. 14(2): 101-116.
- Vrugt, J.A., Gupta, H.V., Dekker S.C., Sorooshian S. & Wagener T.B.W., (2006), Application of stochastic parameter optimization to the Sacramento soil moisture accounting model, Journal of Hydrolog. 325(1): 288-307.
- Yapo, P.O., Gupta, H.V. & Sorooshian, S, (1998), Multi-objective global optimization for hydrologic models, Journal of Hydrology, 204, 83-97.