اکوهیدرولوژی

دورهٔ ۴، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۶، ص ۱۱۲۷-۱۱۱۷

تحلیل حساسیت مدل احتساب‌کنندهٔ رطوبت خاک برای شبیه‌سازی پیوسته در حوضهٔ بهشت‌آباد

الهام کیانی سلمی[۱]، افشین هنربخش[۲*]، خدایار عبدالهی[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

۲. دانشیار گروه آبخیزداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

۳. استادیار گروه آبخیزداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۱/۰۵؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۵/۲۰)

چکیده

آنالیز حساسیت ابزار مناسبی برای نمایش اختلاف خروجی‌ها درنتیجهٔ تغییر در پارامترهای مدل است. از کاربردهای این نوع تحلیل یافتن پارامترهای حساس برای کالیبره‌کردن و شناسایی ورودی‌های مهم در سیستم است. هدف از این پژوهش، تحلیل حساسیت پارامترهای مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS(SMA)4.2 و بررسی واسنجی پارامترهای مدل SMA (احتساب‌کنندهٔ رطوبت خاک) به‌عنوان بخشی از مدل HEC-HMS است. در تحقیق حاضر ضمن واسنجی و اعتبارسنجی مدل HEC-HMS(SMA) حساسیت دستی و خودکار پارامترهای مدل در حوضهٔ آبخیز بهشت‌آباد تحلیل شده است. برای شبیه‌سازی از آمار دبی، بارش، دما و تبخیر و تعرق ایستگاه بهشت‌آباد طی دورهٔ آماری ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۵ به‌صورت آمار روزانه استفاده شد، از داده‌های ۱۳ سال این بازهٔ زمانی برای واسنجی و از چهار سال آخر برای اعتبارسنجی استفاده شد. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی داده‌ها به‌ترتیب مقدار ضریب راندمان و ریشهٔ میانگین مربعات خطا ۰/۶۹۶، (m^3/s) ۱۳/۲ برای واسنجی و مقدار ضریب راندمان و ریشهٔ میانگین مربعات خطا ۰/۶۳، (m^3/s)۷ برای اعتبارسنجی به‌دست آمده، تحلیل حساسیت خودکار با نرم‌افزار HEC-HMS4.2 صورت گرفت. طبق نتایج پارامترهای ذخیرهٔ خاک، ذخیرهٔ کششی و ثابت افت بیشترین حساسیت را در واسنجی مدل داشتند که اهمیت این عوامل را در فرایند مدل‌سازی پیوسته در حوضهٔ مد نظر نشان می‌دهد.

کلیدواژگان: اعتبارسنجی، ثابت افت، ضریب راندمان، مدل هیدرولوژیکی.

* نویسندهٔ مسئول

Email: afshin.honarbakhsh@gmail.com

Archive of SID

www.SID.ir

مقدمه

بررسی حساسیت و بهینه‌سازی پارامترهای اندازه‌گیری‌شده در واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی که پارامترهای متعددی را شامل می‌شوند، یکی از مسائل مهم شبیه‌سازی است. شناسایی پارامترهای حساس به واسنجی به کالیبره‌شدن زودتر و دسترسی به راندمان بیشتر مدل‌های هیدرولوژیکی کمک می‌کند. در نوع متداول تحلیل حساسیت یا تک‌متغیره، درصدی از مقادیر پارامترهای واسنجی‌شدهٔ مدل به پارامتر اضافه یا کم می‌شود و با مشاهدهٔ درصد تغییرات مقادیر متغیر حساس شناسایی می‌شود. متغیر حساس متغیری است که با کمترین تغییرات بیشترین اثر را بر معیار ارزیابی مدل داشته باشد.

به‌طور کلی، میزان بارندگی روی یک حوضهٔ مشخص، به بخش‌های مختلفی تقسیم می‌شود که اهمیت هر یک از آن‌ها بستگی به شرایط موجود در آن حوضه دارد. بخشی از آن، که به بارش مؤثر شناخته می‌شود، به‌صورت نفوذ و بخشی دیگر به رواناب تبدیل می‌شود. بارش مؤثر حاصل کسر بارندگی کل از پارامترهایی همچون برگاب، نفوذ، ذخیرهٔ آب در چالاب‌های سطح زمین و پروفیل خاک و تبخیر و تعرق از مجموعهٔ عواملی است که در یک حوضه سبب تلفات و مانع تبدیل مستقیم بارش به رواناب می‌شود.

شبیه‌ساز پرکاربرد HEC-HMS یکی از مدل‌های هیدرولوژیکی شبیه‌سازی بارش- رواناب، همان نسخهٔ بهبودیافتهٔ مدل HEC-1 است که در سال ۱۹۹۸ توسط مرکز هیدرولوژی ارتش ایالات‌متحده تهیه شده است. اطلاعات مورد نیاز مدل، شامل اطلاعات نفوذ، بارش، مشخصات آبراهه‌ها و...است. این مدل هیدرولوژیکی تحت سیستم‌عامل ویندوز است و در مطالعات هیدرولوژیکی و سیل‌خیزی کاربرد فراوان دارد. برای کاربردی‌کردن مدل‌های بارندگی- رواناب، انجام مراحل مختلفی مد نظر قرار می‌گیرد که یکی از مراحل مشکل‌ساز و وقت‌گیر، مرحلهٔ واسنجی یا تخمین پارامترهای مدل است. از مهم‌ترین قابلیت‌های جدید مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS4.2 علاوه بر عملیات واسنجی و کالیبراسیون، تحلیل حساسیت خودکار است که به درک بهتر پارامترهای مولد عدم اطمینان در فرایند مدل‌سازی کمک می‌کند.

پس از تجارب موفق مرکز مهندسان هیدرولوژیک ارتش امریکا (HEC) به‌منظور مدل‌سازی هیدرولوژیکی پیوسته و بر اساس مدل PRMS، الگوریتم احتساب رطوبت خاک (SMA) را به نرم‌افزار HMS اضافه کرد [۱]. این الگوریتم (SMA) در تحقیقات بنت (۱۹۹۸) و بنت و پیترز (۱۹۹۸) به همراه جزئیات کامل آورده شده است. با توجه به کاربردهای گستردهٔ این الگوریتم، پژوهش‌های مختلفی در سراسر جهان روی مدل HEC-HMS و تابع تلفات بارش انجام‌شده که نتایج قابل قبولی به‌دست آمده است [۵- ۷]. با این‌حال، مطالعات به‌صورت پیوسته و با مدل SMA زیاد انجام نگرفته است.

در سال ۲۰۱۰ انرو در بخش جانسون شبیه‌سازی را با مدل تابع تلفات (SMA) انجام داد و نتایج پژوهش او نشان داد شبیه‌سازی پیوسته نتایج بهتری ارائه می‌دهد [۴]. در سال ۲۰۱۳، مونیانز و همکارانش از مدل HEC-HMS برای مدیریت منابع آب استفاده کردند. آنها برای محاسبهٔ تلفات از روش احتساب‌کنندهٔ رطوبت خاک (SMA) و برای روندیابی از روش ماکسینگام استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمدهٔ دبی اوج و زمان اوج را به‌خوبی شبیه‌سازی کرد [۳]. سیلوا و همکارانش (۲۰۱۴) مدل‌سازی هیدرولوژیکی در رودخانهٔ کلانی در سریلانکا را با استفاده از داده‌های بارندگی انجام دادند. کالیبراسیون مدل نشان داد مدل HEC-HMS شبیه‌سازی را به‌خوبی انجام داده است و می‌توان از آن در کنترل سیل و مدیریت منابع آب استفاده کرد [۲]. رضاییان‌زاده و همکارانش در سال ۲۰۱۳ در حوضهٔ قصر شیرین شبیه‌سازی پیوسته را با مدل SMA انجام دادند و حساسیت پارامترهای این مدل را بررسی کردند. آنها پارامتر ذخیره و نفوذپذیری خاک را به‌عنوان پارامترهایی با بیشترین حساسیت از بین ورودی‌های مدل معرفی کردند [۱۲]. روی و همکارانش (۲۰۱۳) در هندوستان مدل HEC-HMS را بررسی کردند. آنها پس از واسنجی مدل از طریق تابع تلفات بارش از این مدل برای بررسی عوامل اقلیمی روی منابع آبی منطقه استفاده کردند. آنها پس از بررسی نتایج با مقادیر مشاهداتی، عملکرد خوب مدل را تأیید کرده و شبیه‌سازی جریان با این مدل را قابل قبول ارزیابی کردند. آنها با تحلیل حساسیت پارامترهای مدل هیدرولوژیکی SMA، پارامترهای ذخیرهٔ خاک، ذخیرهٔ کششی و ضریب آب‌های زیرزمینی مخزن ۱ را به‌عنوان پارامترهای حساس به واسنجی معرفی کردند [۲۳].

وایکهون و همکارانش در سال ۲۰۱۵ مدل تابع تلفات در رودخانه‌ای در هندوستان را بررسی کردند. آنها با افزایش ۱۰ درصدی در مقدار پارامترهای مدل SMA با روش دستی،

Archive of SID

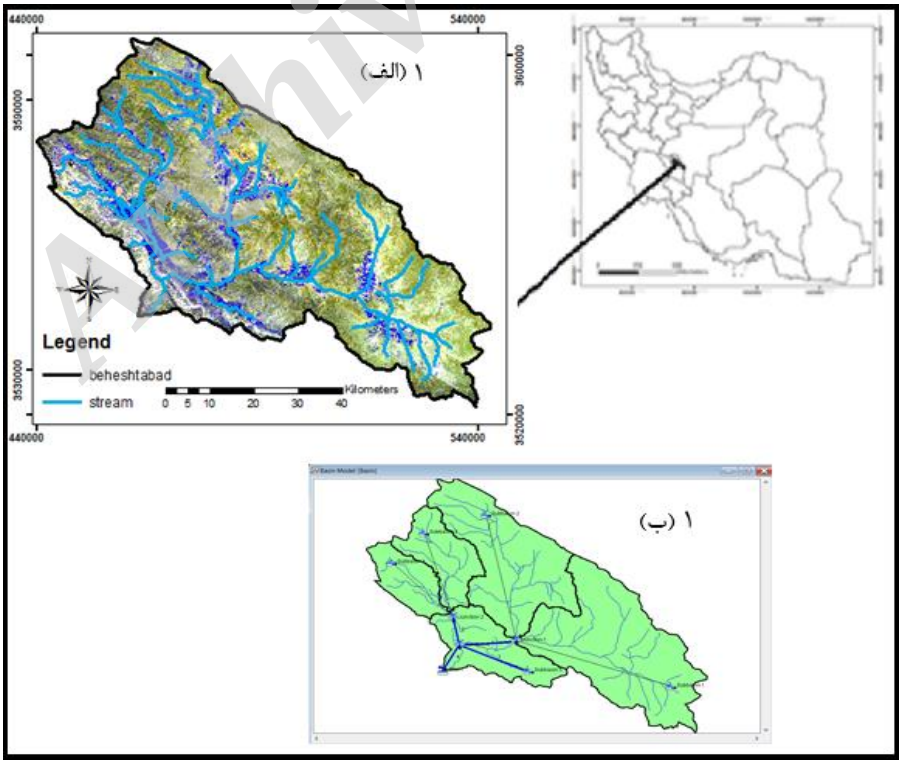
www.SID.ir

حساسیت را تحلیل کردند. آنها با تغییر هر پارامتر به‌صورت جداگانه بقیهٔ پارامترها را ثابت نگه داشتند و تغییر هر پارامتر را در شبیه‌سازی به‌صورت نمودار ترسیم کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد پارامتر ذخیرهٔ خاک و بیشترین نفوذ حساس‌ترین پارامترها هستند [۲۰]. باویان و همکارانش در سال ۲۰۱۷ با استفاده از داده‌های رطوبت خاک و مدل SMA شبیه‌سازی پیوسته را برای پیش‌بینی سیلاب در رودخانه‌ای در کانادا انجام دادند. تحلیل حساسیت پارامترهای SMA مانند ذخیرهٔ خاک، بیشترین نفوذ، نفوذ خاک و ذخیرهٔ کششی به‌منظور تعیین پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد مدل نشان داد پارامتر ذخیرهٔ خاک مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامتر در واسنجی مدل است [۲۲].

طبق نتایج مطالعهٔ هان (۲۰۰۲) که حساسیت را به دو روش محلی و کلی تحلیل کرد، در روش محلی هر پارامتر به‌صورت جداگانه بررسی می‌شود، در حالی که در روش کلی همهٔ پارامترها در یک زمان ارزیابی می‌شوند [۱۱]. در مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS4.2 امکان تحلیل حساسیت به هر دو روش محلی و کلی فراهم شده است. قابلیت حساسیت‌سنجی خودکار بخش جدیدی در مدل HEC-HMS است. هدف این پژوهش، ارزیابی و واسنجی و تحلیل حساسیت دستی و خودکار پارامترهای هیدرولوژیکی مدل احتساب‌کنندهٔ رطوبت خاک در برآورد رواناب به کمک مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS در حوضهٔ آبخیز بهشت‌آباد بخشی از حوضهٔ آبریز کارون بزرگ است. هدف نهایی این پژوهش، کمک به واسنجی سریع‌تر و بهتر مدل و همچنین شناخت پارامترهای حساسی است که اثر قوی‌تری بر خروجی و نتایج مدل دارند.

منطقهٔ مطالعه‌شده

حوضهٔ آبخیز بهشت‌آباد بزرگ‌ترین زیرحوضهٔ کارون شمالی با مساحت ۳۸۸۰ کیلومترمربع در استان چهارمحال و بختیاری واقع شده است و بین عرض‌های جغرافیایی شمالی ۳۱ درجه و ۲۸ دقیقه و ۳۲ درجه و ۵۶ دقیقه و طول‌های جغرافیایی شرقی ۵۰ درجه و ۳۶ دقیقه و ۵۱ درجه و ۴۵ دقیقه قرار دارد. ارتفاع متوسط حوضهٔ بهشت‌آباد ۲۳۱۷ متر و دارای بارش متوسط ۵۴۰ میلی‌متر در سال (آمار ۱۰ ساله بارندگی) است. بارش زمستان به‌صورت برف و باران است و به‌علت برف موجود در این حوضه، اطلاعات دما اهمیت زیادی دارد. حوضهٔ بهشت‌آباد جزء مناطق کارستی کشور است و از نظر منابع آب زیرزمینی اهمیت بسیار زیادی دارد. شکل ۱ الف موقعیت این حوضه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. الف) موقعیت جغرافیایی حوضهٔ بهشت‌آباد؛ ب) مدل حوضهٔ بهشت‌آباد در HEC-HMS4.2

Archive of SID

www.SID.ir

داده‌های استفاده‌شده

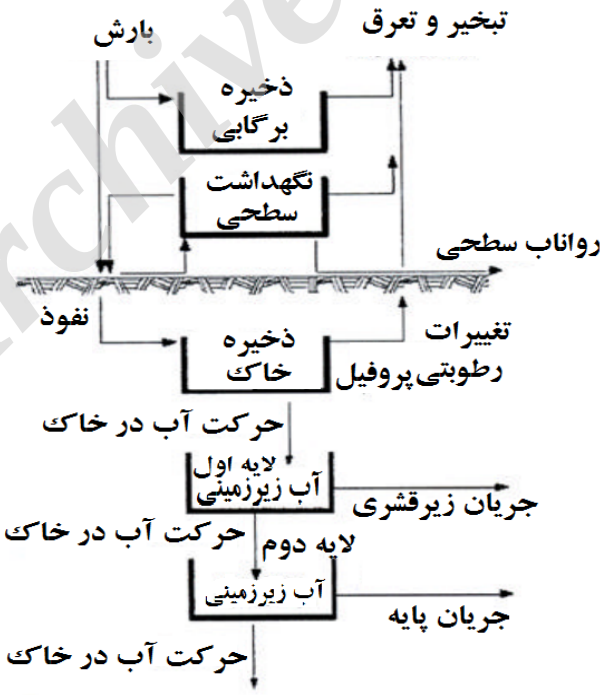
داده‌های استفاده‌شده در این تحقیق داده‌های بارش، دما، دبی و تبخیر و تعرق به‌صورت آمار روزانه در سال‌های آماری ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۵ میلادی هستند که اطلاعات از ایستگاه هواشناسی بهشت‌آباد گرفته شده است. از داده‌های سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۱ برای واسنجی و از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۵ برای صحت‌سنجی استفاده شد (جدول ۱). با توجه به وجود برف موجود در منطقه از اطلاعات دما نیز در این مطالعه برای شبیه‌سازی رواناب ناشی از برف استفاده شده است.

روش بررسی

در این پژوهش از مدل تابع تلفات بارش[1] (SMA) که به‌صورت پیوسته در مدل HEC-HMS4.2 آمده، استفاده شده است [۳]. برای تهیهٔ مدل حوضه، در روش SMA نیازی به معرفی جغرافیایی حوضهٔ مطالعه‌شده نیست و می‌توان مدل را با یک شکل فرضی (شماتیک) نیز اجرا کرد. در این پژوهش، با معرفی حوضهٔ مطالعه‌شده و شبکهٔ آبراهه‌های حوضهٔ آبخیز بهشت‌آباد به پیش‌زمینهٔ[2] مدل حوضه، زیرحوضه‌ها و چگونگی اتصال آنها به یکدیگر و خروجی حوضه مشخص شد (شکل ۱ ب). اگر شدت بارندگی از شدت نفوذ بیشتر باشد، بخشی از بارندگی در سطح حوضه باقی می‌ماند. این مقدار آب پس از پرکردن گودال‌های سطح زمین در امتداد شیب به راه می‌افتد و از طریق رودخانهٔ اصلی از حوضه خارج می‌شود. به این بخش از بارندگی که می‌توان مقدار آن را در رودخانه اندازه‌گیری کرد، رواناب سطحی اطلاق می‌شود. همان طور در شکل ۲ مشاهده می‌شود، این مدل با استفاده از لایه‌های ذخیره‌کننده، حوضه را معرفی می‌کند [۱].

جدول ۱. داده‌های استفاده‌شده برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل HEC-HMS

ردیف	داده	واسنجی و اعتبارسنجی
۱	۲۳ سپتامبر ۱۹۹۸ تا ۲۲ سپتامبر ۲۰۱۱	واسنجی
۲	۲۳ سپتامبر ۲۰۱۱ تا ۲۲ سپتامبر ۲۰۱۵	اعتبارسنجی



شکل ۲. الگوریتم احتساب‌کنندهٔ رطوبت خاک (براساس مدل HEC HMS ۲۰۰۰)

1. Soil Moisture Accounting
2. Background

Archive of SID

www.SID.ir

الگوریتم احتساب‌کنندهٔ رطوبت خاک ۱۴ پارامتر را بررسی می‌کند، SMA به‌وسیلهٔ پنج لایهٔ ذخیرهٔ برگابی، نگه‌داشت سطحی، ذخیرهٔ خاک، لایهٔ اول آب زیرزمینی و لایهٔ دوم آب زیرزمینی است. همچنین مقادیر ذخیرهٔ برگابی، لایهٔ ذخیره‌ای، ذخیرهٔ چالابی، نفوذ سطحی، رواناب سطحی و همچنین ذخیرهٔ خاک و ذخیرهٔ زیرزمینی را پس از بارش باران در نظر می‌گیرد [۱]. پس از آزمون تجربی کارایی روش‌های مختلف تبدیل بارش مازاد به رواناب نقطه‌ای از هیدروگراف واحد کلارک[1] استفاده شد [۱۵]. برای مدل‌سازی ذوب برف نیز از شاخص دما[2] استفاده شده است و برای بررسی آب‌پایه[3] نیز از روش افت محدود[4] استفاده شد. روش افت محدود با استفاده از داده‌های آب‌پایهٔ ماهانه برای طول دورهٔ آماری بررسی‌شده برآورد شده است. مقادیر تفکیک‌شدهٔ آب‌پایهٔ ماهانه از آمار طولانی‌مدت دبی روزانه و سایت جداساز هیدروگراف WHAT[5] برآورد شده است. در جدول زیر روش‌های برآورد پارامترهای استفاده‌شده در مدل نشان داده شده است.

بهینه‌سازی و تحلیل حساسیت خودکار

در هر مدل‌سازی برخی از پارامترهای مدل نسبت به دیگر پارامترها حساس‌تر هستند، به‌طوری که با کوچک‌ترین تغییر در ارزش آنها تفاوت زیادی بین نتیجهٔ مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده صورت می‌گیرد. بنابراین، منظور از تعیین پارامترهای حساس برآورد و پیش‌بینی رفتار مدل است. در مدل HEC-HMS4.2 تحلیل حساسیت به‌صورت خودکار صورت می‌گیرد، به این‌صورت که ابزار Optimization Trial Manager مقادیر واسنجی‌شدهٔ پارامترها را فراخوانی می‌کند و حد بالا و پایین برای پارامترها مشخص می‌شود. به‌طور پیش‌فرض مدل تحلیل حساسیت پارامترها را با تغییر در ۱۰ درصد پارامترها انجام می‌دهد. در بهینه‌سازی می‌توان همهٔ پارامترها را با هم وارد و فرایند تحلیل حساسیت را به‌صورت کلی انجام داد و یا اینکه پارامترهای مربوط به هر بخش را وارد کرد تا به‌صورت جداگانه فرایند بهینه‌سازی انجام شود.

جدول ۲. روش‌های تحلیل پارامترهای مدل HEC-HMS

اجزای مدل هیدرولوژیکی	روش انتخاب	پارامترهای شبیه‌سازی‌شده	فرایند برآورد پارامتر
روش تلفات	مدل احتساب‌کنندهٔ رطوبت خاک	نفوذ آب زیرزمینی[6]	کالیبراسیون دستی
		ذخیرهٔ آب زیرزمینی[7]	کالیبراسیون دستی
		روندیابی آب زیرزمینی[8]	کالیبراسیون دستی
		ذخیرهٔ خاک[9]	کالیبراسیون دستی
		بیشترین نفوذ[10]	کالیبراسیون دستی
		نفوذ خاک[11]	کالیبراسیون دستی
		ذخیرهٔ خاک	کالیبراسیون دستی
		ذخیرهٔ کششی[12]	کالیبراسیون دستی
روش انتقال	هیدروگراف کلارک	زمان تمرکز[13]	مشاهدات رودخانه
		ضریب ذخیره‌ای[14]	کالیبراسیون دستی
روش آب‌پایه	افت محدود	دبی اولیه[15]	کالیبراسیون دستی
		ثابت افت[16]	کالیبراسیون دستی
		آب‌پایهٔ ماهانه[17]	سایت WHAT

1. Clark Unit Hydrograph
2. Temperature Index
3. Base Flow
4. Bounded Recession
5. Web-based Hydrograph Analysis Tool
6. GW Percolation
7. GW Coefficient
8. Soil Storage
9. Max Infiltration
11. Impervious
12. Tension Storage
13. Time of Concentration
14. Storage Coefficient
15. Initial Discharge
16. Recession Constant
17. Base Flow

Archive of SID

www.SID.ir

تحلیل حساسیت دستی

در تحلیل حساسیت دستی با تغییر در مقادیر واسنجی‌شدهٔ پارامترها، پارامترهایی مشخص می‌شوند که بیشترین حساسیت را بر نتایج ارزیابی مدل دارند. پارامترهایی که بیشترین حساسیت را دارند، زودتر بهینه می‌شوند. در حالی که پارامترهای غیرحساس به‌سادگی به‌اندازهٔ واقعی خود نزدیک نمی‌شوند. به‌طور کلی، روش دستی دشوارتر از روش خودکار است، ولی این مزیت را دارد که می‌توان تحلیل حساسیت را برای مقادیر متفاوت (درصد کمتر و بیشتری از مقدار اولیهٔ پارامتر) انجام داد. روش تحلیل حساسیت به‌صورت دستی با استفاده از فرمول ۱ ارزیابی شد.

$$SA \cong \frac{O_{P+\Delta P} - O_{P-\Delta P}}{۲\Delta P} \qquad (۱)$$

SA: مقدار حساسیت تابع هدف حاصل از تغییر در اندازهٔ پارامتر، $O(P \pm \Delta P)$ مقدار جدید خروجی مدل حاصل از تغییر در مقدار پارامترهای ورودی، P مقدار پارامترهای ورودی و ΔP تغییر در مقدار پارامتر (معمولاً ۱۰ یا ۱۵ درصد از مقدار پارامترهای اولیه) است [۱۱ و ۱۳].

ارزیابی کارایی مدل

برای ارزیابی مدل از شاخص ضریب راندمان نش- ساتکلیف (NSE) ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است.

$$NSE = ۱ - \left(\frac{\sum_{i=۱}^{n}\left(O_i - P_i\right)^۲}{\sum_{i=۱}^{n}\left(O_i - \bar{O}\right)^۲}\right) \qquad (۲)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=۱}^{n}\frac{\left(O_i - p_i\right)^۲}{n}} \qquad (۳)$$

در روابط ارائه‌شده Oi داده‌های مشاهده‌ای، $\bar{O}$ میانگین داده‌های مشاهده‌ای، Pi داده‌های شبیه‌سازی‌شده، n تعداد داده‌هاست.

نتایج و بحث

نتایج بهینه‌سازی و تحلیل حساسیت خودکار: بهینه‌سازی در سه مرحله و بین پارامترهای آب‌پایه، تابع تلفات و ضریب انتقال صورت گرفت. نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد حساسیت پارامتر ضریب ذخیره‌ای و زمان تمرکز بین پارامترهای روش انتقال کلارک، پارامتر ثابت افت از بین پارامترهای روش برآورد آب‌پایه بیشترین حساسیت را در واسنجی مدل دارند و پارامتر ثابت افت به‌عنوان پارامتر بسیار حساس شناخته شد. با توجه به اینکه بهینه‌سازی خودکار فقط با اضافه‌کردن ۱۰ درصد از مقادیر داده‌ها صورت می‌گیرد، هیچ‌یک از پارامترهای مدل SMA به تحلیل حساسیت واکنش نشان ندادند.

جدول ۳. نتایج تحلیل حساسیت خودکار پارامترهای مدل HEC-HMS

پارامتر	مقادیر کالیبره‌شدهٔ دستی	مقادیر بهینه‌شدهٔ خودکار	حساسیت پارامتر
روش انتقال			
زمان تمرکز	۱۲	۱۱/۲۹	۰/۱۶
ضریب ذخیره‌ای	۶۷	۶۱/۷۹	۰/۰۳
پارامترهای آب‌پایه			
دبی اولیه	۳۲	۳۲	۰
ثابت افت	۱	۱	-۲۰/۶۶

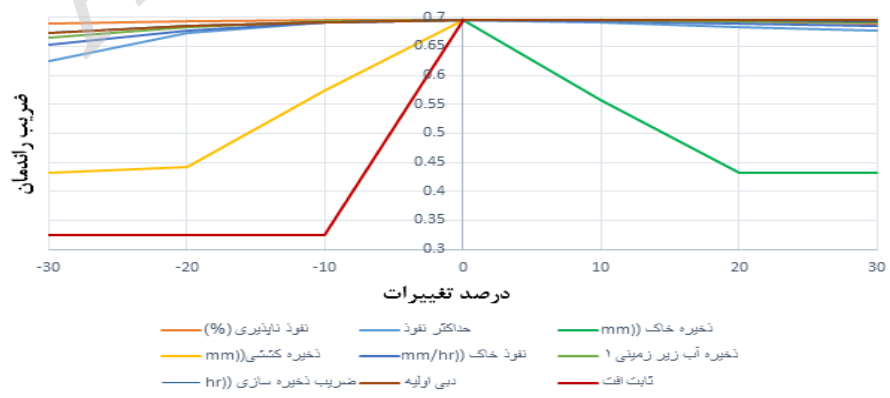
نتایج تحلیل حساسیت: شش پارامتر از پارامترهای الگوریتم احتساب‌کنندهٔ رطوبت خاک شامل بیشترین نفوذ، نفوذناپذیری (٪)، ذخیرهٔ خاک (mm)، ذخیرهٔ کششی (mm)، نفوذ خاک (mm/hr)، ذخیرهٔ آب زیرزمینی ۱ و یک پارامتر از پارامترهای ضریب انتقال، ضریب ذخیره‌سازی (hr) و دو پارامتر از پارامترهای آب‌پایه شامل دبی اولیه، ثابت افت با تغییر در مقادیرشان (۱۰ تا ۳۰ درصد) در معیارهای ارزیابی مدل تغییر ایجاد کردند و به تحلیل حساسیت، حساسیت نشان دادند. در بین این پارامترها، پارامترهای ذخیرهٔ خاک (mm)، ذخیرهٔ کششی (mm) و ثابت افت بیشترین حساسیت را نشان دادند. با تغییر در این پارامتر، مقادیر ارزیابی مدل نسبت به مرحلهٔ کالیبراسیون تغییر قابل توجهی می‌کنند و مشخص می‌شود که این پارامتر در واسنجی مدل اهمیت بیشتری دارد. در جدول ۴ میزان تغییرات معیارهای ارزیابی مدل نسبت به مقدار اولیه مشخص شده است. شکل‌های ۳ و ۴ نیز میزان تغییرات پارامترها را نسبت به ارزیابی مدل نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد هرچه میزان درصد تغییرات بیشتر باشد، پارامترهای بیشتری حساسیت نشان می‌دهند.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۴. نتایج آنالیز حساسیت پارامتر مدل

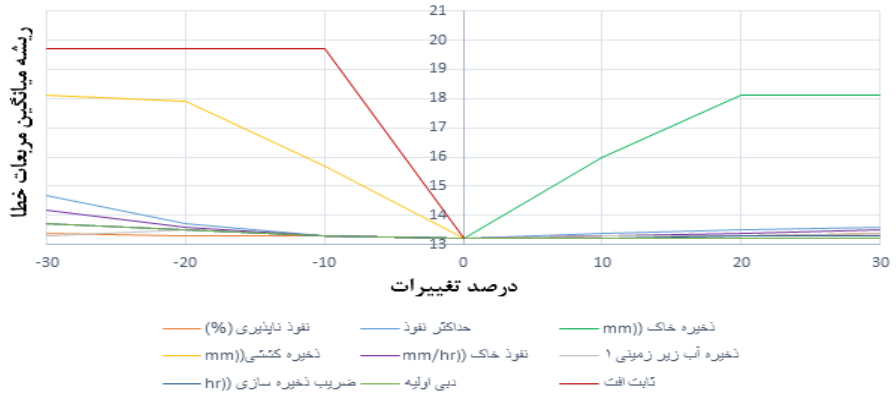
نوع پارامتر	درصد تغییرات پارامتر						
بیشترین نفوذ	-۳۰	-۲۰	-۱۰	۰	۱۰	۲۰	۳۰
شاخص ضریب راندمان	۰/۶۲۵	۰/۶۷۴	۰/۶۹۲	۰/۶۹۲	۰/۶۹۱	۰/۶۸۳	۰/۶۷۸
ریشهٔ میانگین مربعات خطا (m^3/s)	۱۴/۷	۱۳/۷	۱۳/۳	۱۳/۲	۱۳/۴	۱۳/۵	۱۳/۶
نفوذناپذیری (٪)	-۳۰	-۲۰	-۱۰	۰	۱۰	۲۰	۳۰
شاخص ضریب راندمان	۰/۶۸۹	۰/۶۹۳	۰/۶۹۵	۰/۶۹۶	۰/۶۹۵	۰/۶۹۳	۰/۶۹
ریشهٔ میانگین مربعات خطا (m^3/s)	۱۳/۴	۱۳/۳	۱۳/۳	۱۳/۲	۱۳/۳	۱۳/۳	۱۳/۴
ذخیرهٔ خاک (mm)	-۳۰	-۲۰	-۱۰	۰	۱۰	۲۰	۳۰
شاخص ضریب راندمان	-	-	-	۰/۶۹۶	۰/۵۵۸	۰/۴۳۱	۰/۴۳۱
ریشهٔ میانگین مربعات خطا (m^3/s)	-	-	-	۱۳/۲	۱۶	۱۸/۱	۱۸/۱
ذخیرهٔ کشش (mm)	-۳۰	-۲۰	-۱۰	۰	۱۰	۲۰	۳۰
شاخص ضریب راندمان	۰/۴۳۲	۰/۴۴۳	۰/۵۷۳	۰/۶۹۶	-	-	-
ریشهٔ میانگین مربعات خطا (m^3/s)	۱۸/۱	۱۷/۹	۱۵/۷	۱۳/۲	-	-	-
نفوذ خاک (mm/hr)	-۳۰	-۲۰	-۱۰	۰	۱۰	۲۰	۳۰
شاخص ضریب راندمان	۰/۶۵۳	۰/۶۷۸	۰/۶۹۱	۰/۶۹۶	۰/۶۹۴	۰/۶۸۹	۰/۶۸۶
ریشهٔ میانگین مربعات خطا (m^3/s)	۱۴/۲	۱۳/۶	۱۳/۳	۱۳/۲	۱۳/۳	۱۳/۴	۱۳/۵
ذخیرهٔ آب زیرزمینی ۱	-۳۰	-۲۰	-۱۰	۰	۱۰	۲۰	۳۰
شاخص ضریب راندمان	۰/۶۶۴	۰/۶۸۴	۰/۶۹۳	۰/۶۹۶	۰/۶۹۵	۰/۶۹۳	۰/۶۹۱
ریشهٔ میانگین مربعات خطا (m^3/s)	۱۳/۳	۱۳/۵	۱۳/۳	۱۳/۲	۱۳/۳	۱۳/۳	۱۳/۴
ضریب ذخیره‌سازی (hr)	-۳۰	-۲۰	-۱۰	۰	۱۰	۲۰	۳۰
شاخص ضریب راندمان	۰/۶۷۳	۰/۶۸۶	۰/۶۹۳	۰/۶۹۶	۰/۶۹۶	۰/۶۹۵	۰/۶۹۳
ریشهٔ میانگین مربعات خطا (m^3/s)	۱۳/۷	۱۳/۵	۱۳/۳	۱۳/۲	۱۳/۲	۱۳/۳	۱۳/۳
دبی اولیه	-۳۰	-۲۰	-۱۰	۰	۱۰	۲۰	۳۰
شاخص ضریب راندمان	۶۷/۴	۰/۶۸۶	۶۹/۲	۰/۶۹۶	۰/۶۹۶	۰/۶۹۶	۰/۶۹۶
ریشهٔ میانگین مربعات خطا (m^3/s)	۱۳/۷	۱۳/۵	۱۳/۳	۱۳/۲	۱۳/۲	۱۳/۲	۱۳/۲
ثابت افت	-۳۰	-۲۰	-۱۰	۰	۱۰	۲۰	۳۰
شاخص ضریب راندمان	۳۲/۵	۳۲/۵	۳۲/۶	۰/۶۹۶	-	-	-
ریشهٔ میانگین مربعات خطا (m^3/s)	۱۹/۷	۱۹/۷	۱۹/۷	۱۳/۲	-	-	-



شکل ۳. حساسیت تغییرات پارامترها نسبت به ضریب راندمان

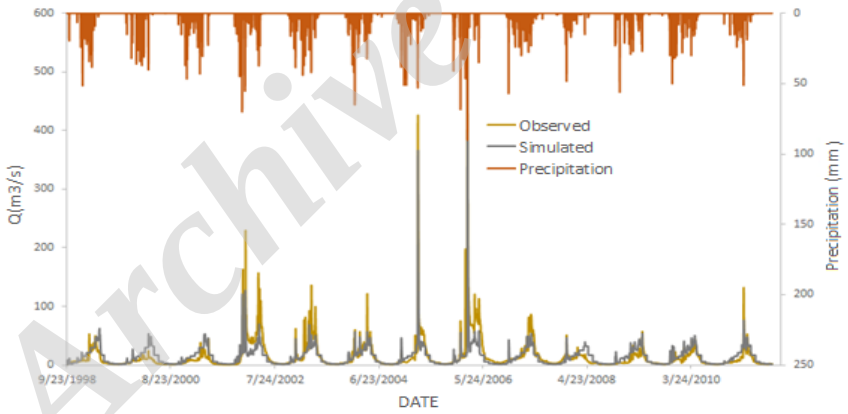
Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۴. حساسیت تغییرات پارامترها نسبت به ریشهٔ میانگین مربعات خطا

واسنجی مدل: ضمن درنظرگرفتن معیارهای کارایی مدل (ضریب راندمان نش- ساتکلیف) به‌عنوان تابع هدف، واسنجی مدل به‌صورت دستی و پارامترهای اولیه نیز بر پایهٔ قضاوت کارشناسی به روش سعی و خطا و با استفاده از منابعی که قبلاً تحقیقات را انجام داده‌اند، صورت گرفت [۱، ۸، ۹ و ۱۰]. در شکل ۵ هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شدهٔ مقادیر دبی مشخص شده است. علاوه بر مقادیر واسنجی‌شده در جدول ۴، مقادیر پارامترهای واسنجی‌شده که در تحلیل حساسیت پارامتر غیرحساس شناخته شدند و همچنین پارامترهای واسنجی‌شدهٔ شاخص دما در جدول‌های ۵- ۷ آمده است. با توجه به شکل ۵، هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده برازش لازم را دارند و با مقدار ضریب راندمان ۰/۶۹۶ و ریشهٔ میانگین مربعات خطا (۱۳/۲ (m^3/s) در محدودهٔ قابل قبول قرار می‌گیرند.



شکل ۵. هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در مرحلهٔ واسنجی

جدول ۵. پارامترهای واسنجی‌شدهٔ مدل SMA

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
ذخیرهٔ اولیه ٪	۵	ذخیرهٔ کششی (mm)	۲۱۸
بیشترین ذخیره (mm)	۳	نفوذ خاک (mm/hr)	۳/۵
ذخیرهٔ خاک ٪	۵۰	ذخیرهٔ آب زیرزمینی ۱ (mm)	۲۱۷
ذخیرهٔ آب زیرزمینی ۱٪	۳۰	نفوذ آب زیرزمینی ۱ (mm/hr)	۰/۱
ذخیرهٔ آب زیرزمینی ۲٪	۱۵	روندیابی آب زیرزمینی ۱ (hr)	۴۲۰
بیشترین نفوذ (mm/hr)	۳۸	ذخیرهٔ آب زیرزمینی ۲ (mm)	۱۳۵
نفوذناپذیری ٪	۵	نفوذ آب زیرزمینی ۲ (mm/hr)	۰/۳
ذخیرهٔ خاک (mm)	۲۳۳	روندیابی آب زیرزمینی ۱ (hr)	۴۰۰

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۶. پارامترهای واسنجی‌شدهٔ ذوب برف

پارامتر (واحد)	مقدار واسنجی‌شدهٔ پارامتر	توضیحات
PX Temperature (C)	۰	دمایی که کمتر از آن بارش به‌صورت برف رخ می‌دهد.
Base Temperature (C)	-۰/۰۱	دمایی که بیشتر از آن ذوب برف داریم.
Wet melt rate (MM/DEG C-DAY)	۴	نرخ شاخص ذوب برف
Rain Rate Limit (MM/DAY)	۲۳	شاخص تمایز ذوب خشک از ذوب بارانی
ATI-Melt rate Function	جدول ۷	نرخ ذوب برف
ATI-Melt rate coefficient	۰/۱	شاخص دمای پیشین ذوب برف
Cold Limit (mm/DAY)	۱۰	حد سرمایشی
ATI-Cold rate Coefficient	۰/۷	ضریب به‌روزرسانی ظرفیت سرمایشی
Water Capacity (%)	۶	بیشترین ظرفیت آب
Ground melt (mm/day)	۲	نرخ ذوب برف از گرمای زمین

جدول ۷. نرخ ذوب برف (ATI-Melt rate Function)

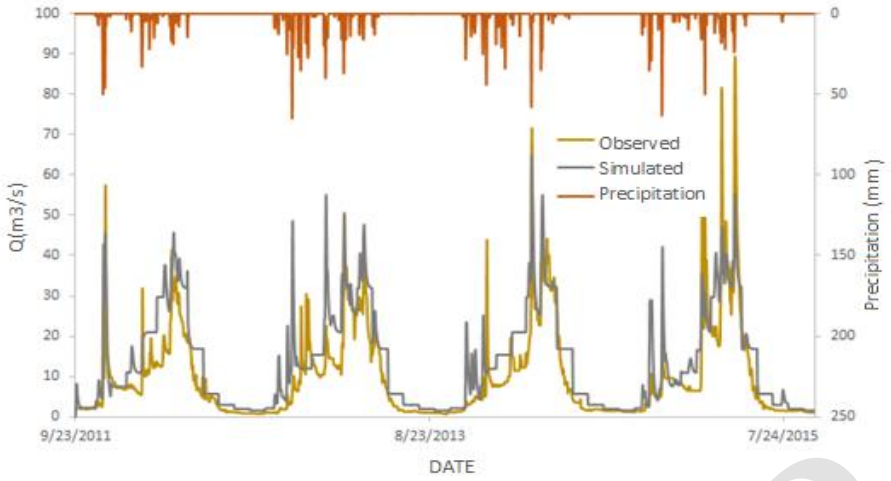
درجهٔ روز[2]	نرخ ذوب[1]	درجهٔ روز	نرخ ذوب	درجهٔ روز	نرخ ذوب
۰	۱/۱	۸/۵	۳/۸	۱۷	۶/۷
۰/۵	۱/۲	۹	۴	۱۷/۵	۶/۸
۱	۱/۴	۹/۵	۴/۲	۱۸	۶/۹
۱/۵	۱/۵	۱۰	۴/۴	۱۸/۵	۷
۲	۱/۶	۱۰/۵	۴/۶	۱۹	۷/۱
۲/۵	۱/۷	۱۱	۴/۸	۱۹/۵	۷/۱
۳	۱/۹	۱۱/۵	۵	۲۰	۷/۲
۳/۵	۲	۱۲	۵/۲	۲۰/۵	۷/۳
۴	۲/۲	۱۲/۵	۵/۴	۲۱	۷/۳
۴/۵	۲/۳	۱۳	۵/۵	۲۱/۵	۷/۴
۵	۲/۵	۱۳/۵	۵/۷	۲۲	۷/۵
۵/۵	۲/۷	۱۴	۵/۹	۲۲/۵	۷/۵
۶	۲/۸	۱۴/۵	۶	۲۳	۷/۵
۶/۵	۳	۱۵	۶/۲	۲۳/۵	۷/۶
۷	۳/۲	۱۵/۵	۶/۳	۲۴	۷/۶
۷/۵	۳/۴	۱۶	۶/۴		
۸	۳/۶	۱۶/۵	۶/۶		

صحت‌سنجی: پس از واسنجی و کالیبراسیون مدل SMA برای مدت ۱۱ سال (از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۱)، برای اطمینان از قابل پذیرش بودن مقادیر پارامترها اقدام به شبیه‌سازی بارش- رواناب با همان مقادیر به‌دست‌آمده و اعمال ورودی جدید شد و از داده‌های سال آماری ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۵ برای صحت‌سنجی بهره گرفته شد. با مقایسهٔ هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی می‌توان صحت انجام کار را مشاهده کرد. مقدار ضریب راندمان برای اعتبارسنجی ۰/۶۳ و ریشهٔ میانگین مربعات خطا (m3/s) ۷ به‌دست آمده است. شکل ۶ هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی در مرحلهٔ اعتبارسنجی را نشان می‌دهد.

1. ATI (DEG C-DAY)
2. Melt rate (MM/DEG C-DAY)

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۶. هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در مرحلهٔ اعتبارسنجی

نتیجه‌گیری

با توجه به مقادیر ضریب راندمان (۰/۶۹۶ و ۰/۶۳) و همچنین مقدار ریشهٔ میانگین مربعات خطا (۱۳/۲ و ۷) در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل می‌توان بیان کرد که مدل HEC-SMA برای پیش‌بینی مقادیر بارش- رواناب مناسب بوده و نتایج قابل قبولی را ارائه داده است. علت پله‌پله‌شدن هیدروگراف شبیه‌سازی‌شده اعمال دبی مشاهداتی به‌صورت ماهانه است که با حذف آثار روش آب‌پایه انجام شده است. طبق مشاهدات جدول ۴ و شکل‌های ۵ و ۶، پارامتر ثابت افت در برآورد آب‌پایه بیشترین حساسیت را در تحلیل حساسیت دستی و خودکار نشان داده است.

از آنجا که مقدار ثابت افت در حوضهٔ مطالعه‌شده نباید از عدد یک بیشتر شود، این پارامتر در تحلیل حساسیت دستی با مقادیر بیشتر از مقدار یک واکنش نشان نمی‌دهد و مقادیر بیشتر از این مقدار را نمی‌توان برای تحلیل حساسیت آن استفاده کرد. با توجه به این نکته که پارامتری که بیشترین حساسیت را در کمترین تغییرات نشان می‌دهد، حساسیت بیشتری دارد. همچنین پارامتر ثابت افت بیشترین حساسیت را در تحلیل حساسیت پارامترها نشان داده است. با توجه به شرایط حوضهٔ مطالعه‌شده از نظر منابع آب‌های زیرزمینی و اهمیت آب‌پایه نتایج این پژوهش اهمیت برآورد آب‌پایه در حوضهٔ مطالعه‌شده را بیان می‌کند.

نتایج مدل نشان از اهمیت عوامل خاکی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی دارد. دو پارامتر از پارامترهای مدل احتساب‌کنندهٔ رطوبت خاک شامل مقادیر ذخیرهٔ خاک (mm) و ذخیرهٔ کششی (mm) بیشترین حساسیت را در تحلیل حساسیت دستی نشان دادند، نتایج تحقیقات جین و همکارانش (۲۰۱۵) و رضاییان‌زاده و همکارانش (۲۰۱۰) نیز نتایج مشابهی داشته و معلوم شده است که از بین پارامترهای مدل احتساب‌کنندهٔ رطوبت خاک، ذخیرهٔ خاک بیشترین حساسیت را دارد که با نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیقات یادشده منطبق است. مقدار ذخیرهٔ خاک همیشه باید بیشتر از مقدار ذخیرهٔ کششی باشد، بنابراین تحلیل حساسیت برای مقادیر کمتر از مقدار واسنجی‌شدهٔ ذخیرهٔ خاک و بیشتر از مقدار واسنجی‌شدهٔ ذخیرهٔ کششی به تحلیل حساسیت واکنش نشان نمی‌دهند.

با توجه به اینکه پارامترهای مدل HEC-HMS به‌صورت دستی واسنجی می‌شوند و در همهٔ مطالعات مربوط به این مدل داده‌ها با روش صحیح و خطا و از مطالعات قبلی به‌دست می‌آیند. شناخت پارامترهای حساس یادشده به واسنجی می‌تواند تأکیدی بر رطوبت پیشین خاک و اهمیت فاکتورهای خاکی باشد. تجربهٔ این مدل‌سازی نشان داد از چنین تحلیل‌هایی در برآورد سریع‌تر و بهتر پارامترهای در مناطق مختلف به‌خصوص در مناطق استفاده کرد که منابع آب زیرزمینی کارکرد غالبی دارند. هرچند در مدل‌سازی اخیر سعی شده است که با داده‌های حداقل شبیه‌سازی با مشاهده‌ای تطبیق مناسبی پیدا کند، اما یکی از محدودیت‌های مطالعهٔ پیش رو تعداد ایستگاه‌های استفاده‌شده است که در صورت افزایش عدم اطمینان نسبت به محاسبات کاهش خواهد یافت.

Archive of SID

www.SID.ir

منابع

[1]. Bennett T .Development and application of a continuous soil moisture accounting algorithm for the Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System, HEC-HMS: MSc Thesis Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ of California, Davis, Calif.1998.

[2]. Silva D, Weerakoon. Srikantha Hearth. Modeling of Event and Continuous Flow Hydrographs with HEC–HMS: Case Study in the Kelani River Basin, Sri Lanka. Journal of Hydrology.2014:19:800-806.

[3]. Munyaneza O, Mukubwa A, Maskey S, Wenninger J, Uhlenbrook S. Assessment of surface water resources availability using catchment modeling and the results of tracer studies in the meso-scale Migina Catchment, Rwanda. Hydrology and Earth System Sciences. 2013:10:15375–15408.

[4]. Enroe E.M. Guidelines for continuous simulation of streamflow in Johnson County, Kansas, with HEC-HMS. Ph.D. Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Kansas.2010.

[5]. Garcia A, Sainz A, Revillaa JA, Álvareza C, Juanesa J. A, Puentea A. Surface water resources assessment in scarcely gauged basins in the north of Spain. Journal of Hydrology.2008:356: 312-326.

[6]. Dawdy D R, O'Donnell T. Mathematical model of catchment behavior. ASCE Hydraulic Div.1965: 91: 123-137.

[7]. JamesL D, Burges S. J. Selection, calibration, and testing of hydrologic models, in Hydrologic Modeling of Small Watersheds. Edited by C.T. Haan, H.P. Johnson, D.L. Brakensiek, and American Society of Agricultural Engineers. Monograph.1982: 5:437-472.

[8]. Fleming M, Neary V. Continuous hydrologic modeling study with the hydrologic modeling system. J.Hydrol. Eng. 2004:9(3):175-183.

[9]. United States Department of Agriculture (USDA).Urban Hydrology for Small Watersheds.1986:55.

[10]. US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources (USACE).HEC-HMS Technical Reference Manual, Davis, C.A.2000.

[11]. Haan C.T. Statistical methods in hydrology. Second Edition, Iowa State Press, 2002:496.

[12]. Rezaeian Zadeh M, Abghari H, Singh V, Jamshidi H, Moradzadeh A. Improvement of Continuous Hydrologic Models and HMS SMA Parameters Reduction.2010.

[13]. McCuen RH, Modeling hydrologic change. Statistical methods. Lewis Publishers.2003:433.

[14]. Clark C O, Storage and the unit hydrograph: Transactions: American Society of Civil Engineers, 1945:1419-1488.

[15]. Saghafian B, Tajrishi M, Taheri Shahraini H, Jalali M. Modeling spatial variability of daily rainfall in southwest of Iran. Scientia Iranica. 2003:10: 164-174.

[16]. Rostamian R, Jalali A, Afyuni M, Mousavi SF, Heidarpour M, Jalalian A and Abbaspour KC. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques. 2008:53(5): 977-988,

[17]. Kamali B, MousaviS J, & Abbaspour K C. Automatic calibration of HEC-HMS using single-objective and multi-objective PSO algorithms. Hydrological processes.2012.

[18]. RezaeianZadeh, M. Hydrologic Simulation of Khosrow Shirin Watershed One of Mollasadra Dam Sub basins Using Stanford Watershed Model- IV (SWM-IV). MSc thesis, Dept. of Water Structures Engineering, University of Shiraz.2009.

[19]. Waikhom RS, Manoj K, Jain .Continuous Hydrological Modeling using Soil Moisture Accounting Algorithm in Vamsadhara River Basin, India. Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering. 2015: 4: 398-408

[20]. Nash and Sutcliffe. River flow forecasting through conceptual models, Part I: A discussion of principles". J. Hydrology, 1970:10(3):282-290.

[21]. Bhuiyan H, McNairn H, Powers J, Merzouki A. Application of HEC-HMS in a Cold Region Watershed and Use of RADARSAT-2 Soil Moisture in Initializing the Model. j. Hydrology, 2017.

Archive of SID

www.SID.ir