نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیستم، شماره پنجم، ۱۳۹۲
http://jwsc.gau.ac.ir

بررسی عدم قطعیت پارامترهای مدل بارش- رواناب WetSpa با استفاده از روش مونت‌کارلو

آتنا کبیر[1]* و عبدالرضا بهره‌مند[2]

[1] دانش‌آموخته دکتری گروه آبخیزداری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران،
[2] دانشیار گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ دریافت: ۹۰/۷/۱۲ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۱/۲۳

چکیده

بررسی و کمی کردن عدم قطعیت پارامترهای مدل‌های بارش- رواناب به‌طور عمده در دهه اخیر مطرح شده است و در این‌حال یکی از چالش‌های مهم هیدرولوژی در سطح مجامع بین‌المللی به‌شمار می‌رود. بر خلاف کاربرد آسان بیش‌تر مدل‌های مفهومی بارش- رواناب، به‌علت تعداد زیاد پارامترها و نبود درک فیزیکی از آن‌ها، این مدل‌ها در مرحله واسنجی پارامترها با مشکل مواجه هستند. در این پژوهش عدم قطعیت پارامترهای مدل WetSpa با روش مونت‌کارلو در حوزه آب‌خیز گرگان‌رود، استان گلستان بررسی گردیده است. WetSpa یک مدل توزیعی بر پایه GIS می‌باشد که در مقیاس حوزه عمل کرده و برای پیش‌بینی سیلاب و مدیریت حوزه آب‌خیز توسعه‌یافته است. مدل فیزیکی بوده و قادر است فرایندهای هیدرولوژیکی را به‌طور پیوسته در زمان و مکان شبیه‌سازی نموده و تعادل آب و انرژی را در هر سلول رستری برقرار نماید. عمده عدم قطعیت شبیه‌سازی مدل‌ها، ناشی از ساختار مدل و تعریف نکردن صحیح پارامترها می‌باشد. بنابراین برای پیش‌بینی صحیح رواناب، عدم قطعیت پارامترها و به‌تبع عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها باید مدنظر قرار گرفته شود. به‌کارگیری روش مونت‌کارلو برای تحلیل نداشتن قطعیت پارامترها منجر به تعیین محدوده مناسب تغییرات پارامترها گردید. نتایج بیانگر این بودند که فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق (K_{ep})، کوتاه‌ترین دامنه را دارا بوده و در نتیجه از حساسیت بالایی برخوردار است. در حالی‌که فاکتور آب زیرزمینی اولیه (g_0) و ضریب روز- درجه بارش (K_{rain})، دارای بیش‌ترین عدم قطعیت می‌باشند و از حساسیت کمی برخوردارند.

واژه‌های کلیدی: مدل بارش- رواناب، WetSpa، نداشتن قطعیت، مونت‌کارلو، گرگان‌رود

* مسئول مکاتبه: kabir_atena@yahoo.com

Archive of SID
www.SID.ir

مقدمه

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 صورتی‌که 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 حوزه 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 ثانیاً این‌که 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 می‌باشد. بنابراین واسنجی مدل برای بهبود عملکرد مدل لازم است (لیو و همکاران، ۲۰۰۵). اما متأسفانه واسنجی مدل با وجود ضرورت آن نمی‌تواند تضمین‌کننده واقعیت پیش‌بینی یک مدل باشد. زیرا که مقادیر پارامترهایی که از واسنجی مدل تعیین می‌شوند و همچنین پیش‌بینی‌های بعدی که با استفاده از آن مدل کالیبره شده انجام می‌شوند را تا اندازه‌ای می‌توان واقعی و قابل اعتماد دانست که اولاً فرضیات به‌کار رفته در مدل صحیح بوده و همچنین آمار و اطلاعات به‌کار رفته برای شبیه‌سازی در حوزه از نظر کمی و کیفی دقیق باشند. بنابراین حتی پس از واسنجی مدل، مقادیر زیادی عدم قطعیت به‌طور پتانسیل در نتایج وجود خواهد داشت (بهره‌مند، ۲۰۰۶؛ مولتا و نیکلو، ۲۰۰٤).

روش‌های متعددی برای بهینه‌سازی، آنالیز حساسیت و همچنین بررسی عدم قطعیت مدل‌ها وجود دارد. این روش‌ها به‌طور سنتی به ۲ دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند. ۱- روش‌های گلوبال یا بر مبنای نمونه‌گیری سراسری[1] و ۲- روش‌های لوکال یا تخمین نقطه‌ای محلی[2] (سالتلی، ۲۰۰۰). روش‌های گلوبال یک بررسی سراسری انجام می‌دهند، به این ترتیب که شبیه‌سازی را با استفاده از پارامترهایی که از کل فضای پارامترها نمونه‌برداری کرده‌اند انجام می‌دهند. در حالی‌که روش‌های تخمین نقطه‌ای برای پیدا کردن حالت بهینه جستجو را به‌طور محلی ادامه می‌دهند تا به مرحله‌ای برسند که در همسایگی

1- Global Sampling Based Methods (Global Methods)
2- Local Point-Estimation Method (Local Methods)

www.SID.ir

خود بهبودی حاصل نشود (ون‌گرینسون، ۲۰۰۲). کاربرد تکنیک‌های تخمین پارامترها در دهه‌های اخیر با گسترش چشم‌گیری مواجه بوده است (سروشیان و دراکاپ، ۱۹۸۰؛ کوسزرا، ۱۹۸۳؛ دان و همکاران، ۱۹۹۲). طی سال‌های اخیر برای بهینه‌سازی و بررسی عدم قطعیت پارامترهای مدل، روش‌ها و برنامه‌های کامپیوتری متعددی مورد استفاده قرار گرفته است که از آن‌ها می‌توان به روش‌های PEST[1] (دوهرتی، ۲۰۰۵)، GLUE[2] (بون و بنلی، ۱۹۹۲)، ParaSol[3] (ون‌گرینسون و میکسنر، ۲۰۰۵)، SUFI-2[4] (عباسپور و همکاران، ۲۰۰۷)، SCE[5] (دان و همکاران، ۱۹۹۲) و... اشاره نمود (بهره‌مند، ۲۰۰۶). در مطالعات متعدد به مشکلات موجود در تعیین سری پارامترهای واحد در مدل، به‌علت وجود اپتیمم‌های محلی چندتایی[6]، وجود رابطه غیرخطی موجود بین پارامترهای مدل و... اشاره گردیده است (بیت و کمپبل، ۲۰۰۱). این موضوع باعث گردیده است، امروزه روش‌های بهینه‌سازی کلی توسعه بیش‌تری پیدا نمایند (فین و همکاران، ۲۰۰۸). همچنین در مورد مدل WetSpa از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود. بهره‌مند و دسمت (۲۰۱۰)، مدل WetSpa را در حوزه آب‌خیز بزرگی در اسلواکی، به‌نام توریسا اجرا نموده و با استفاده از نرم‌افزار PEST آنالیز حساسیت و عدم قطعیت پارامترهای مدل را مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج به‌دست آمده از پژوهش‌های آن‌ها K_e یا فاکتور تبخیر و تعرق از بالاترین حساسیت برخوردار می‌باشد. همچنین فاکتور g_{max} یا حداکثر ذخیره آب زیرزمینی دارای بیش‌ترین عدم قطعیت می‌باشد. نتایج مطالعات آن‌ها بیانگر این است که تلفیق مدل‌های هیدرولوژیکی بر پایه GIS با مدل PEST باعث تخمین دقیق‌تر و نزدیک به واقعیت پارامترهای شبیه‌سازی شده می‌گردد. شفیعی و دسمت (۲۰۰۹)، برای پیش‌بینی دبی رودخانه، مدل WetSpa را برای رودخانه هورناد در اسلواکی کالیبره نمودند. آن‌ها به این منظور روش NSGA یا همان الگوریتم ژنتیک را برای یک دوره ده‌ساله مورد امتحان قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از این روش نیز می‌تواند به‌عنوان یک روش واسنجی کارا برای تعیین پارامترهای مدل مورد استفاده قرار گیرد. همان‌طورکه قبلاً نیز اشاره گردید، عمده عدم قطعیت شبیه‌سازی مدل‌ها، ناشی از ساختار مدل و تعریف نکردن صحیح پارامترها می‌باشد. بنابراین برای

1- Parameter Estimator
2- Generalized Likelihood Uncertainty Estimation
3- Parameter Solution
4- Sequential Uncertainty Fitting
5- Shuffled Complex Evolution
6- Multiple Local Optima

www.SID.ir

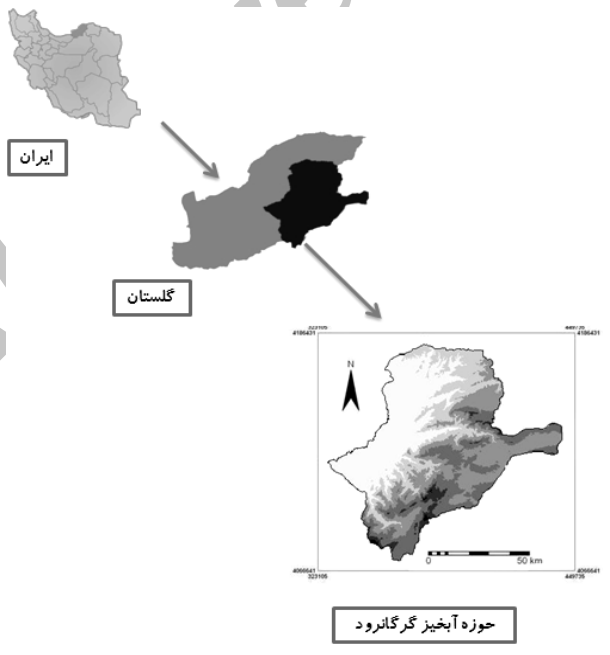
پیش‌بینی صحیح رواناب، عدم قطعیت پارامترها و به‌تبع عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها باید مدنظر قرار گرفته شود (بون و بنلی، ۱۹۹۲). تاکنون در دنیا، این مدل در پژوهش‌های متعددی مانند حوزه باربیک در بلژیک (دسمت و همکاران، ۲۰۰۰)، حوزه رودخانه آلزت در لوکزامبورگ (لیو و همکاران، ۲۰۰۳)، حوزه کارستی سومویی در ویتنام (لیو و همکاران، ۲۰۰۵)، حوزه آب‌خیز هورناد دراسلواکی (بهره‌مند و همکاران، ۲۰۰۶)، حوزه آب‌خیز لتیان در ایران (زینی‌وند و دسمت، ۲۰۰۸؛ زینی‌وند و دسمت، ۲۰۰۹b)، حوزه رودخانه مارگسانی در اسلواکی (زینی‌وند و دسمت، ۲۰۰۹a)، حوزه رودخانه گرگان‌رود (کبیر و همکاران، ۲۰۱۱)، حوزه رودخانه چاوهه در چین (یانگ و همکاران، ۲۰۱۱) و... مورد مطالعه قرار گرفته است. مرور نتایج به‌دست آمده از این مطالعات نشان می‌دهد که مدل به‌خوبی قادر به اداره فرایندهای هیدرولوژیکی، درشرایط گوناگون توپوگرافی، خاک، کاربری، مساحت و... بوده و در این زمینه از توانایی بالایی برخوردار است. یکی از روش‌های بررسی عدم قطعیت روش مونت‌کارلو است. برای تعیین عدم قطعیت فرض بر این است که سری پارامترهای مختلف، ممکن است برازش تقریباً یکسانی بین رواناب محاسبه‌ای و مشاهده‌ای ایجاد کنند. در این حالت برای هر پارامتر محدوده به‌نسبت وسیع مقادیر براساس واسنجی اولیه تعیین شده و سپس سری متناهی پارامترها با استفاده از اعداد تصادفی به‌دست آمده از توزیع یکنواخت در محدوده مشخص برای هر پارامتر تولید می‌شود. سپس برای هر سری پارامترها، مدل بارش- رواناب اجرا شده و کارایی آن با معیارهای مختلف نیکویی برازش ارزیابی می‌شود. در این حالت روش مونت‌کارلو شبیه‌سازی مناسبی در محدوده پارامترها حتی برای پارامترهای حساس ارایه می‌دهد (بینلی و همکاران، ۱۹۹۱). هدف از انجام این پژوهش، بررسی عدم قطعیت پارامترهای مدل WetSpa با استفاده از روش کلی مونت‌کارلو می‌باشد، که برای تعیین آن از آمار دبی‌های ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری قزاقلی استفاده گردید. پس از بررسی آمار هواشناسی موجود در سازمان آب منطقه‌ای استان گلستان و بررسی شرایط حوزه‌های آب‌خیز استان، حوزه آب‌خیز گرگان‌رود و سال‌های آبی ۷۴-۱۳۶۲ برای اجرای مدل انتخاب گردید. علت انتخاب این دوره برای شبیه‌سازی این بود که اولاً این دوره دارای آمار کامل‌تری نسبت به سایر دوره‌ها بوده و تعداد داده‌های گمشده کم‌تری مشاهده می‌شد، ثانیاً بعد از این دوران در حوزه، شاهد ناهمگنی آمار بودیم که ناشی از ایجاد تاسیسات مختلف مانند انواع سدهای خاکی و انحرافی، سیستم‌های پخش سیلاب و... می‌باشد. علاوه‌بر این‌ها از آن‌جایی‌که ایستگاه‌ها توسط سازمان‌های مختلف و در سال‌های متفاوت تاسیس گردیده‌اند، بنابراین دارای سال‌های آماری یکسانی

www.SID.ir

نبودند. در دوره انتخابی نام برده، هم شرایط فیزیکی حوزه یک شرایط کاملاً طبیعی بود و هیچ دست‌کاری سازه‌ای قابل‌توجهی در داخل حوزه صورت نگرفته بود و هم این‌که داده‌ها دارای هماهنگی کامل بودند. از این ۱۳ سال دوره آماری، ۷ سال (سال‌های ٦٩-١٣٦٢) برای واسنجی مدل و ٦ سال (سال‌های ٧٤-١٣٦٩)، برای اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شدند و مدل با پایه زمانی روزانه اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

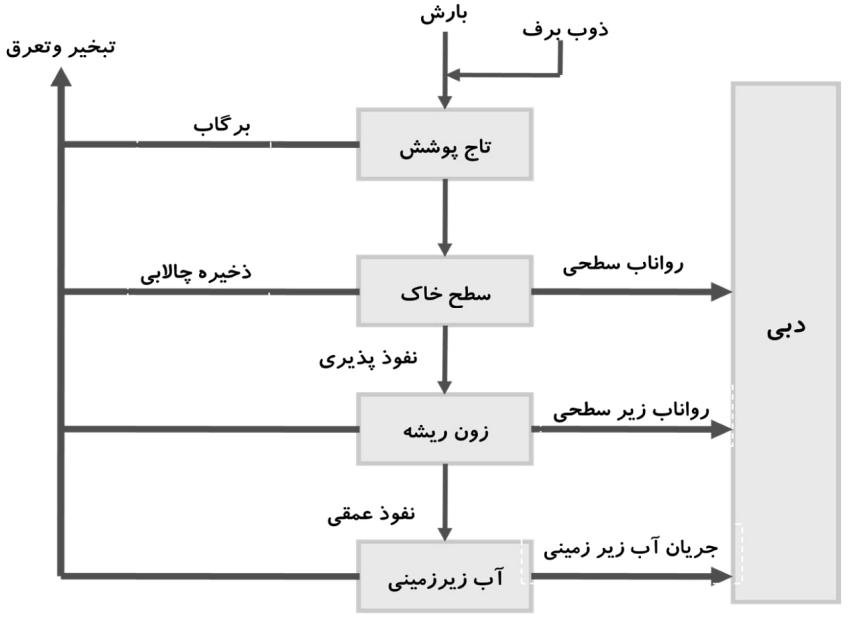
معرفی منطقه مورد مطالعه: حوزه آب‌خیز مورد مطالعه جزیی از حوزه آب‌خیز گرگان‌رود را شامل می‌شود که از نظر تقسیمات استانی جزیی از استان گلستان بوده و از نظر مختصات جغرافیایی محدود به طول‌های ٣٦ درجه و ٤٥ دقیقه و ٣٧ درجه و ٤٨ دقیقه شرقی و عرض‌های ٥٤ درجه و ٣٦ دقیقه و ٥٦ درجه و ٢٨ دقیقه شمالی می‌باشند. در شکل ١ موقعیت حوزه آب‌خیز مورد مطالعه در ایران و استان گلستان به نمایش گذاشته شده است.



شکل ١- موقعیت حوزه آب‌خیز مورد مطالعه در استان گلستان.

www.SID.ir

معرفی مدل WetSpa: مدل برای بیان تعادل آب و انرژی در هر شبکه سلولی از چندین لایه استفاده می‌نماید و هر یک از فرآیندهای بارش، ذخیره برگابی، ذوب برف، ذخیره چالابی، نفوذپذیری، تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی، رواناب سطحی، جریان زیرسطحی و جریان آب زیرزمینی را در بردارد. سیستم هیدرولوژیکی شبیه‌سازی شامل ٤ لایه در جهت عمودی می‌باشد: تاج پوشش، سطح خاک، زون ریشه و سفره آب زیرزمینی اشباع. شکل ۲ به‌طور شماتیک ساختار مدل را در سطح پیکسل نمایش می‌دهد.



شکل ۲- ساختار مدل WetSpa در مقیاس پیکسل.

مجموعه‌ای از رابطه‌های فیزیکی و تجربی برای شرح هر یک از این فرآیندها در نظر گرفته شده است که در زیر به‌طور اجمالی به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. در مدل WetSpa تعادل آب در زون ریشه برای هر شبکه سلولی با توجه به رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$D_i\left[\theta_i(t)-\theta_i(t-1)\right]_i = F_i(t)-ES_i(t)-RG_i(t)-RI_i(t) \qquad (1)$$

www.SID.ir

که در آن، $\theta_i(t)$ و $\theta_i(t-1)$: محتوای رطوبت خاک سلول در زمان t و t-۱، D_i: عمق ریشه (میلی‌متر)، $F_i(t)$: نفوذپذیری به سطح خاک در بازه زمانی (میلی‌متر) که شامل نفوذپذیری در طی بارش و نفوذپذیری از ذخیره چالابی پس از بارش می‌باشد، $ES_i(t)$: تبخیر و تعرق واقعی از سطح خاک برای گام زمانی (میلی‌متر)، $RG_i(t)$: نفوذ عمقی به خارج از زون ریشه یا تغذیه آب زیرزمینی (میلی‌متر)، $RI_i(t)$: اینترفلو یا جریان زیرسطحی کم‌عمق افقی به خارج از سلول (میلی‌متر) در گام زمانی. در مدل WetSpa برای تخمین رواناب سطحی، از یک روش ضریب اصلاحی استفاده شده است که در آن رواناب در رابطه با عواملی چون توپوگرافی، بافت خاک، کاربری زمین، رطوبت خاک و شدت بارش بیان می‌شود:

$$PE_i(t) = C_i\left[P_i(t) - I_i((t))\right]\left[\frac{\theta_i(t)}{\theta_{i,s}}\right]^a \qquad (۲)$$

که در آن، $PE_i(t)$: بارش مازاد در سلول i در گام زمانی (میلی‌متر)، $I_i(t)$: تلفات برگابی (میلی‌متر)، $\theta_i(t)$: محتوای رطوبتی خاک در زمان t (میلی‌مترمکعب بر میلی‌مترمکعب)، $\theta_{i,s}$: پروزیته یا تخلخل خاک (میلی‌مترمکعب بر میلی‌مترمکعب)، α: نمایی است در رابطه با شدت بارندگی (-)، C_i: ضریب بارش مازاد پتانسیل یا ضریب رواناب پتانسیل در سلول i (-). از آن‌جایی‌که اطلاعات کمی راجع به سنگ بستر موجود است، برای محاسبه دبی آب زیرزمینی در مقیاس زیرحوزه از یک مفهوم ساده به‌نام مخزن خطی استفاده می‌شود. همچنین روش مخزن غیرخطی یکی از گزینه‌های انتخابی در مدل می‌باشد که در آن ذخیره آب زیرزمینی دارای توان ۲ است. جریان خروجی آب زیرزمینی و رواناب‌های تولید شده در هر زیرحوزه با همدیگر جمع شده و جریان کل در خروجی زیرحوزه را تشکیل می‌دهند. معادله کلی جریان آب زیرزمینی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$QG_s(t) = K_g\left[SG_s(t)/۱۰۰۰\right]^m \qquad (۳)$$

که در آن، $QG_s(t)$: متوسط میزان جریان آب زیرزمینی در خروجی زیر حوزه (مترمکعب بر ثانیه)، $SG_s(t)$: ذخیره آب زیرزمینی زیر حوزه در زمان t (میلی‌متر)، (-) m: توانی است که در مخزن خطی مساوی با ۱ و برای مخزن غیرخطی ۲ در نظر گرفته می‌شود و C_g: ضریب افت آب زیرزمینی در سطح زیرحوزه که واحد آن در مخزن خطی (مترمربع بر ثانیه) و در مخزن غیرخطی (یک بر متر در ثانیه) می‌باشد (ویتنبرگ، ۱۹۹۹). K_g: ضریب افت آب زیرزمینی در سطح زیرحوزه که واحد آن در مخزن

Archive of SID

www.SID.ir

خطی (مترمربع بر ثانیه) و در مخزن غیرخطی (یک بر متر در ثانیه) می‌باشد. جریان آب سطحی و زیرسطحی ابتدا در هر شبکه سلولی به‌سوی کانال اصلی روندیابی می‌شود و در خروجی هر زیرحوزه به آب زیرزمینی می‌پیوندد و سپس کل جریان به‌سمت خروجی کل حوزه روندیابی می‌گردد. روندیابی جریان سطحی و جریان آبراهه با استفاده از روش معادله‌های تقریب موج پخشی سنت ونانت انجام می‌گیرد (میلر و کانز، ۱۹۷۵).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c_i \frac{\partial Q}{\partial x} - d_i \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \qquad (٤)$$

که در آن، Q (مترمکعب بر ثانیه): دبی جریان در زمان t (ثانیه) و مکان x (متر)، c_i: سرعت موج سینماتیکی در سلول i (متر بر ثانیه)، d_i: ضریب پخشیدگی در سلول i (مترمربع بر ثانیه). در نهایت می‌توان هیدروگراف جریان خروجی را به‌صورت زیر تعیین نمود:

$$Q_i(t) = \sum_{\tau=0}^{t-\tau} V_i(\tau) U_i(t-\tau) \qquad (٥)$$

که در آن، $Q_i(t)$: جریان خروجی در انتهای مسیر که با هر ورودی دلخواه در سلول i تولید می شود (مترمکعب بر ثانیه)، $U_i(t-\tau)$: تابع پاسخ مسیر جریان که مربوط به هیدروگراف واحد لحظه‌ای (IUH) که در هر هیدرولوژی مرسوم است می‌باشد (لیتر بر ثانیه)، τ: تأخیر زمانی (ثانیه)، $V_i(\tau)$:حجم رواناب ورودی در سلول i و در زمان τ (مترمکعب) که شامل رواناب سطحی و جریان زیرسطحی بوده و چنانچه سلول i در خروجی زیر حوزه واقع شده باشد، شامل جریان آب زیرزمینی نیز می‌گردد. بنابراین پاسخ جریان در کل حوزه را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه نمود که در آن، Q(t): دبی کل در خروجی (مترمکعب بر ثانیه) و N_w: تعداد سلول‌ها در کل حوزه می‌باشد.

$$Q(t) = \sum_{i=1}^{N_w} Q_i(t) \qquad (٦)$$

معرفی پارامترهای مدل: برای آسان‌سازی واسنجی پارامترها، ۱۱ پارامتر در مدل WetSpa مورد استفاده قرار گرفته است که عبارتند از فاکتور تصحیح PET، فاکتور جریان زیر سطحی، ضریب افت آب زیرزمینی، رطوبت اولیه خاک، ذخیره آب زیرزمینی اولیه، حداکثر ذخیره آب زیرزمینی، درجه حرارت پایه ذوب برف، ضریب روز درجه حرارت و روز- درجه بارش، توان رواناب سطحی و حداکثر شدت بارش.

Archive of SID

www.SID.ir

کاربرد روش مونت‌کارلو در حوزه آب‌خیز گرگان‌رود: یکی از روش‌های بررسی عدم قطعیت روش مونت‌کارلو است. در این روش فرض بر این است که سری پارامترهای مختلف، ممکن است برازش تقریباً یکسانی بین رواناب محاسبه‌ای و مشاهده‌ای ایجاد کنند. در این حالت برای هر پارامتر محدوده به‌نسبت وسیع مقادیر براساس واسنجی اولیه تعیین شده و سپس سری متناهی پارامترها با استفاده از اعداد تصادفی به‌دست آمده از توزیع یکنواخت در محدوده مشخص برای هر پارامتر تولید می‌شود. سپس برای هر سری پارامترها، مدل بارش- رواناب اجرا شده و کارایی آن با معیارهای مختلف نیکویی برازش ارزیابی می‌شود. با کاهش محدوده پارامترها پس از هر تکرار، دوباره محاسبه‌ها انجام می‌شود تا محدوده تغییرات باریکی برای سری پارمترهای بهینه حاصل شود. معیار نیکویی برازش می‌تواند در تعیین محدوده بهینه پارامترها نقش مهمی داشته باشد. بنابراین تابع هدفی که برای این منظور تعریف می‌شود کاملاً وابسته به اهداف شبیه‌سازی است. در این معادله توابع هدف می‌توانند براساس پارامترهای مختلف هیدروگراف تعریف شوند. در این حالت روش مونت‌کارلو شبیه‌سازی مناسبی در محدوده پارامترها حتی برای پارامترهای حساس ارایه می‌دهد (بینلی و همکاران، ۲۰۰۱). در روش مونت‌کارلو به هر سری مجموعه پارامترهای ورودی، یک مدل ریاضی مدل اتلاق می‌شود. در این روش فرض بر این است که تنها یک‌سری پارامترهای بهینه منحصر به فرد برای یک مدل شبیه‌سازی بارش- رواناب با ساختار معین موجود نیست. بنابراین در صورتی‌که مدل بهینه منحصر به فرد موجود نباشد هر یک از هیدروگراف‌ها با توجه به درجه اطمینان‌شان می‌توانند در پیش‌بینی هیدروگراف سیل وزن بگیرند. درجه اطمینان به مدل می‌تواند با معیارها یا توابع هدف متفاوتی تعریف شود که استفاده از معیار تشابه در این معادله کاربرد فراوانی دارد. به این ترتیب امکان رده‌بندی سری پارامترها با در نظر گرفتن معیار تشابه‌های مختلف وجود خواهد داشت. در این معادله تعدادی از مدل‌ها به‌طور قطع رد خواهند شد که تحت عنوان مدل‌های مردود معرفی می‌شود. در این پژوهش با استفاده از آمار ثبت شده ایستگاه هیدرومتری قزاقلی، عدم قطعیت پارامترهای مختلف مدل WetSpa مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور ابتدا محدوده وسیعی از تغییرات پارامترها حول مقادیر پارامترهای به‌دست آمده از واسنجی اولیه تعریف شد. سپس با استفاده از توزیع یکنواخت سری پارامترهای تصادفی تولید شد و مدل شبیه‌سازی بارش- رواناب با گام زمانی مربوطه به‌ازای هر یک از آن‌ها اجرا شد (حداقل حدود ۱۰۰۰ تکرار انجام گردیده است). در این قسمت با توجه به تابع هدف، تابع تشابه مربوط (معیار ناش- ساتکلیف) برای هر اجرا محاسبه شد. برای حصول به نتایج مطلوب

www.SID.ir

مقدار آستانه تشابه برای رد مدل‌ها در هر تکرار افزایش یافت تا محدوده به‌نسبت باریکی برای پارامترها حاصل شد. در نهایت عدم قطعیت پارامترهای مدل به‌صورت فاصله‌ای در اطراف نتیجه، با سطح احتمال ۹۵ درصد تعیین گردید. به این ترتیب که پس از تعیین میانگین (m) و انحراف معیار (s) پارامترها، محدوده اطمینان برای هر پارامتر به‌صورت بازه‌ای بین $m \pm t_{\alpha,n}s$ تعیین می‌گردد که در این رابطه، $t_{\alpha,n}$ توزیع تی‌استیودنت با احتمال α و درجه آزادی n می‌باشد، که برای مطالعه فعلی با سطح احتمال ۹۵ درصد، ۱/۹٦ تعیین گردید (بهره‌مند و دسمت، ۲۰۰۸). نتایج روش مونت‌کارلو متأثر از نحوه انتخاب معیار تشابه است. معیارهای تشابه متعددی توسط پژوهش‌گران مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش معیار کارایی ناش- ساتکلیف به‌عنوان یک معیار تشابه مورد استفاده قرار گرفت. این فاکتور تعیین کارایی، به‌طور مرسوم برای ارزیابی انواع مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا که واریانس باقی‌مانده‌ها را استاندارد می‌نماید و مقدار عددی آن با طول دوره و میزان رواناب تغییر نمی‌کند.

نتایج و بحث

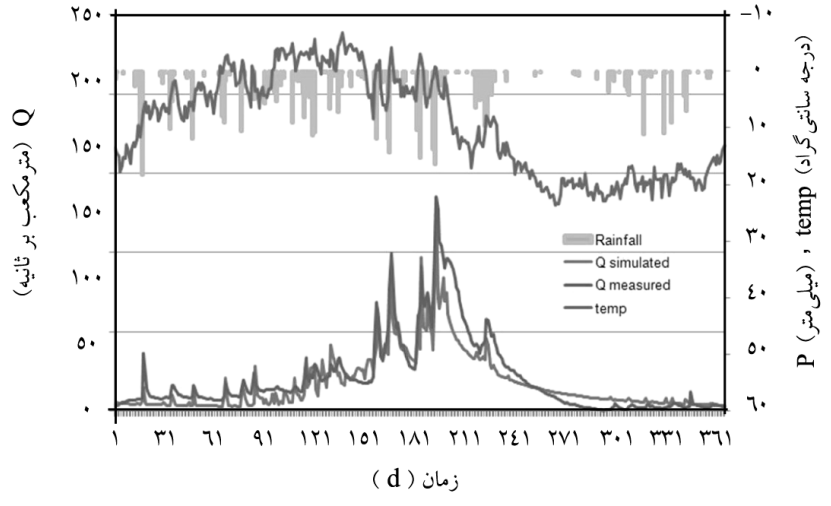
پس از جمع‌آوری اطلاعات پایه حوزه و تهیه آمار و اطلاعات بارندگی، تبخیر و تعرق، دما و دبی لحظه‌ای، مدل WetSpa به‌منظور شبیه‌سازی رواناب در منطقه اجرا گردید. برای تعیین عدم قطعیت پارامترهای مختلف مدل بارش- رواناب، ابتدا محدوده وسیعی از تغییرات پارامترها حول مقادیر پارامترهای به‌دست آمده از واسنجی اولیه مطابق جدول ۱ تعریف شد. سپس با استفاده از توزیع یکنواخت سری پارامترهای تصادفی تولید شد و مدل شبیه‌سازی بارش- رواناب با گام زمانی مربوطه به‌ازای هر یک از آن‌ها اجرا شد. تابع تشابه (معیار ناش- ساتکلیف) مربوط به هر اجرا محاسبه شد. برای حصول به نتایج مطلوب مقدار آستانه تشابه برای رد مدل‌ها در هر تکرار افزایش یافت تا محدوده به‌نسبت باریکی برای پارامترها حاصل شد. جدول ۲ مقادیر شاخص‌های کارایی مدل برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی را نشان می‌دهد. در شکل‌های ۳ و ٤ نیز مقایسه گرافیکی هیدروگراف‌ها به نمایش گذاشته شده است. همچنین در شکل ۵ نتایج به‌دست آمده از محدوده تعیین شده برای عدم قطعیت پارامترها به نمایش گذاشته شده است.

Archive of SID

www.SID.ir

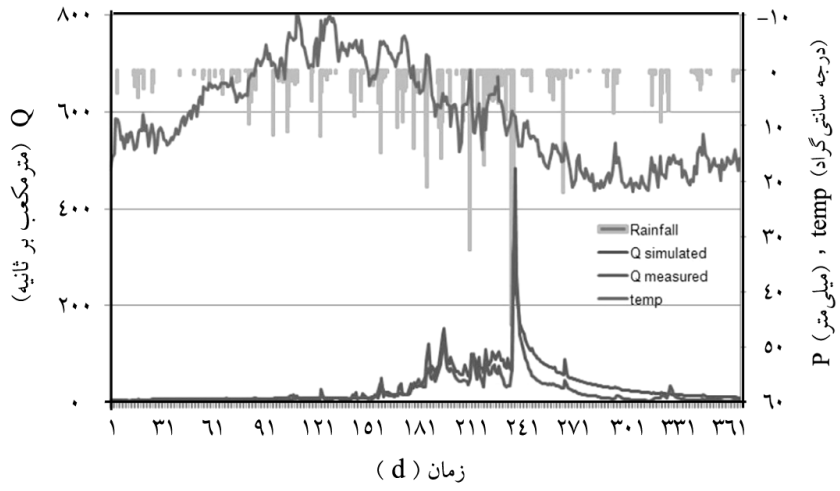
جدول ۱- محدوده پارامترهای در نظر گرفته شده برای تعیین عدم قطعیت در مدل WetSpa.

علامت	پارامتر	حداقل	حداکثر
K_i	فاکتور جریان زیر سطحی (-)	۰/۱	۱۰
K_g	ضریب افت آب زیرزمینی (d^{-1})	$۱/۰\times۱۰^{-۷}$	۰/۱
K_{ss}	رطوبت اولیه خاک (-)	۰/۱	۲
K_{ep}	فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق پتانسیل (-)	۰/۳	۲
G_0	ذخیره آب زیرزمینی اولیه (میلی‌متر)	۰	۱۰۰
G_{max}	حداکثر ذخیره آب زیرزمینی (میلی‌متر)	۱۰۰	۱۰۰۰۰
T_0	ضریب درجه حرارت آستانه (درجه سانتی‌گراد)	-۳	۲
K_{snow}	ضریب روز درجه حرارت ($mm\,^oC^{-1}\,d^{-1}$)	-۳	۲/۳
K_{rain}	ضریب روز درجه بارش ($mm\,^oC^{-1}\,d^{-1}$)	$۱۰^{-٤}$	۳/۰
K_{run}	توان رواناب سطحی (-)	٤	۷
P_{max}	حداکثر شدت بارش (میلی‌متر)	۱۰۰	۵۰۰۰



شکل ۳- مقایسه گرافیکی هیدروگراف روزانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برای دوره واسنجی.

www.SID.ir



شکل ٤- مقایسه گرافیکی هیدروگراف روزانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برای دوره اعتبارسنجی.

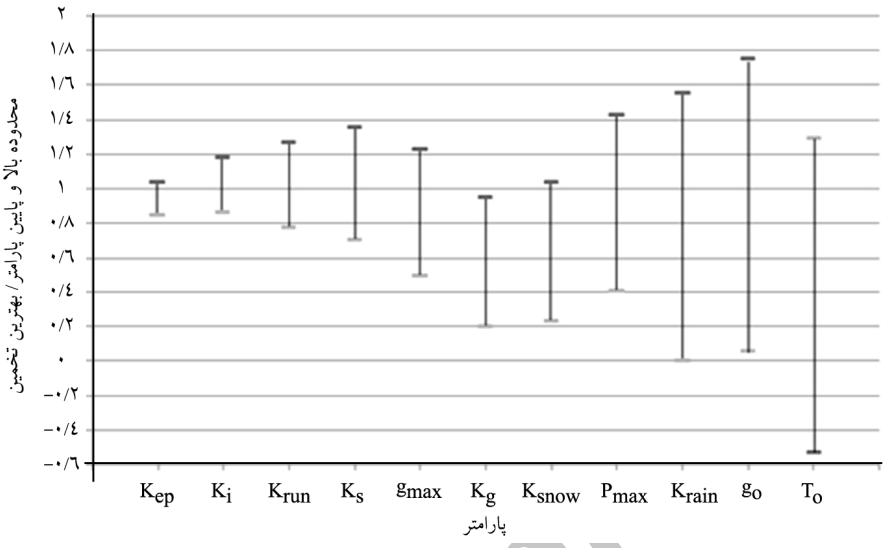
جدول ۲- مقادیر شاخص‌های کارایی مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی.

معیار کارایی	واسنجی	اعتبارسنجی
بیاس مدل برای تعادل حجم جریان (بیلان)	-۰/۰۷۲	۰/۰۰٦
ضریب قطعیت مدل	۰/۷	۰/۷۱
معیار ناش- ساتکلیف	۰/۷۷	۰/۷۱
معیار ناش- ساتکلیف برای جریان‌های بالا	۰/۸٤	۰/۸٤

همان‌طورکه در شکل ۵ مشاهده می‌گردد، فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق دارای کم‌ترین دامنه تغییرات بوده و در نتیجه از حساسیت بالایی برخوردار است. فاکتورهای جریان زیرسطحی و توان رواناب سطحی در مراحل بعدی حساسیت قرار دارند. هم‌چنین فاکتور ذخیره آب زیرزمینی اولیه دارای دامنه تغییرات زیادی بوده و از حساسیت کمی برخوردار است. لازم به ذکر است که در اینجا میزان آستانه تابع تشابه برای رد مدل‌ها، معیار ناش- ساتکلیف ٦۵ درصد در نظر گرفته شده است. همان‌طورکه از شکل نیز پیداست فاکتور آب زیرزمینی اولیه و ضریب روز- درجه بارش دارای بیش‌ترین عدم قطعیت می‌باشند و از حساسیت کمی برخوردارند. آن‌چه مسلم است در این شکل، میزان حساسیت پارامترها از چپ به راست کاهش می‌یابد.

Archive of

www.SID.ir



شکل ۵- محدوده عدم قطعیت هر یک از پارامترهای مدل WetSpa در سطح ۹۵ درصد.

در این پژوهش کاربرد روش مونت‌کارلو برای تعیین عدم قطعیت پارامترهای مدل بارش- رواناب با استفاده از مدل WetSpa بررسی گردید و نتایج آن در این مقاله ارایه گردید. WetSpa یک مدل هیدرولوژیکی- توزیعی بر پایه GIS می‌باشد که در مقیاس حوزه عمل کرده و برای پیش‌بینی سیلاب و مدیریت حوزه آب‌خیز توسعه‌یافته است. در این مطالعه برای اجرای مدل از آمار هواشناسی ۱۳ سال داده روزانه استفاده گردید. نتایج نشان‌دهنده هم‌خوانی بالای هیدروگراف‌های محاسبه‌ای و مشاهده‌ای بودند. دقت شبیه‌سازی بر طبق شاخص ناش- ساتکلیف حدود ۷۷ درصد تعیین گردید. براساس این نتایج می‌توان گفت که مدل با دقت قابل‌قبولی می‌تواند برای شبیه‌سازی جریان رودخانه مورد استفاده قرار گرفته و از قابلیت اعتماد بالایی برخوردار است. همچنین ضریب ناش- ساتکلیف برای جریان‌های بالا حدود ۸٤ درصد به‌دست آمد که این موضوع با هدف اصلی مدل که پیش‌بینی سیلاب می‌باشد، مطابقت دارد. مقایسه گرافیکی هیدروگراف‌های محاسبه‌ای و مشاهده‌ای برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی نیز نشان‌دهنده هم‌خوانی خوب بین دو هیدروگراف می‌باشند. امروزه بررسی و تحلیل عدم قطعیت‌ها در هر پروژه، امری ضروری محسوب می‌شود. معمولاً تخمین پارامترهای مدل به‌علت وجود عدم قطعیت پارامترهای مدل که به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری در میدان نیستند، مشکل

Archive of SID

www.SID.ir

می‌باشد. بنابراین حتی پس از واسنجی مدل، مقادیر زیادی عدم قطعیت به‌طور پتانسیل در نتایج وجود خواهد داشت که علت آن نیز واضح بوده و می‌توان آن را این‌گونه توجیه نمود: ۱- این‌که بعید است آمار و اطلاعات مشاهده‌ای حوزه شامل بارش، دبی، توپوگرافی و... عاری از خطا و اشتباه باشند و ۲- این‌که هیچ مدل شبیه‌سازی نمی‌تواند به‌طور ۱۰۰ درصد بازتاب خصوصیات فیزیکی حوزه باشد. امروزه روش‌های بهینه‌سازی کلی یا گلوبال توسعه بیش‌تری پیدا کرده و از اطمینان بالاتری برخوردارند. روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌عنوان ابزاری برای تحلیل و بررسی یک‌پارچه و هم‌زمان ترکیبات مختلف عدم قطعیت‌ها استفاده می‌گردد. این روش ابزار قدرتمندی برای بررسی پیامد رخداد انواع حالت‌ها عدم قطعیت‌ها می‌باشد که برتری‌های قابل‌توجهی از جمله در نظرگیری رخداد هم‌زمان عدم قطعیت‌ها قابلیت ارایه ابعاد گوناگون تابع مطلوبیت را دارا می‌باشد. به‌کارگیری این روش هم‌زمان با نارضایتی از محاسبه‌های فراوانی که برای تخمین عدم قطعیت‌ها صورت می‌گیرد، از رشد و گسترش فزاینده‌ای برخوردار شده است. با بررسی محدوده تعیین شده برای عدم قطعیت هر یک از پارامترهای مدل با روش مونت‌کارلو، مشخص گردید که فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق (K_{ep})، کوتاه‌ترین دامنه را دارا بوده و در نتیجه از حساسیت بالایی برخوردار است که این موضوع به‌دلیل اثر بارز آن بر بیلان آبی حوزه می‌باشد. در حالی‌که فاکتور آب زیرزمینی اولیه (g_0) و ضریب روز- درجه بارش (K_{rain})، دارای بیش‌ترین عدم قطعیت می‌باشند و از حساسیت کمی برخوردارند که با نتایج بهره‌مند و دسمت (۲۰۰۸) و شفیعی و دسمت (۲۰۰۹) و بهره‌مند و دسمت (۲۰۱۰) مطابقت دارد. بنابراین باید در ضمن واسنجی مدل، دقت بیش‌تری در مورد فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق و همچنین سایر فاکتورها به‌ترتیب حساسیت اعمال نمود. به این ترتیب می‌توان میزان خطا را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. وجود اختلاف در میزان حساسیت پارامترها در سایر پژوهش‌ها را می‌توان به گلوبال نبودن روش بررسی نسبت داد. زیرا همان‌طورکه قبلاً اشاره گردید، روش‌های گلوبال یک بررسی سراسری انجام می‌دهند، به این ترتیب که شبیه‌سازی را با استفاده از پارامترهایی که از کل فضای پارامترها نمونه‌برداری کرده‌اند انجام می‌دهند. در حالی‌که روش‌های تخمین نقطه‌ای برای پیدا کردن حالت بهینه جستجو را به‌طور محلی ادامه می‌دهند تا به مرحله‌ای برسند که در همسایگی خود هیچ بهبودی حاصل نشود.

Archive of SID

www.SID.ir

منابع

1.Abbaspour, KC., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., and Srinivasan, R. 2007. Spatially-distributed modelling of hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. J. Hydrol. 333: 413-430.

2.Bahremand, A. 2006. Simulating the effects of reforestation on floods using spatially distributed hydrologic modeling and GIS. PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.

3.Bahremand, A., De Smedt, F., Corluy, J., Liu, Y.B., Poórová, J., Velcická, L., and Koniková, E. 2006. Application of WetSpa model for assessing landuse impacts on floods in Margesany-Hornad watershed, Slovakia, Water Science and Technology, 53: 10. 37-45.

4.Bahremand, A., and De Smedt, F. 2008. Distributed hydrological modeling and sensitivity analysis in Torysa watershed, Slovakia. Water Resour. Manage. J. 22: 3. 393-408.

5.Bahremand, A., and De Smedt, F. 2010. Predictive Analysis and Simulation Uncertainty of a Distributed Hydrological Model, Water Resource Management, 24: 2869-2880.

6.Bates, B.C., and Campbell, E.P. 2001. Runoff modeling. Water Resour. Res. 37: 4. 937-947.

7.Beven, K.J., and Binley, A. 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction, Hydrological Processes, 6: 3. 279-298.

8.Binley, A.M., Beven, K.J., Calver, A., and Watts, L.G. 1991. Changing responses in hydrology: assessing the uncertainty in physically based model predictions, Water Resour. Res. 27: 6. 1253-1261.

9.De Smedt, F., Liu, Y.B., and Gebremeskel, S. 2000. Hydrological modeling on a catchment scale using GIS and remote sensed land use information, In: Brebbia, C.A. (ed), Risk Analyses II, WIT press, Southampton, Boston, Pp: 295-304.

10.Doherty, J. 2005. PEST: model independent parameter estimation, user manual, 5th edn. Watermark Numerical Computing, Brisbane.

11.Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V.K. 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. Water Resour. Res. 28: 4. 1015-1031.

12.Feyen, L., Kalas, M., and Vrugt, J.A. 2008. Semi-distributed parameter optimization and uncertainty assessment for large-scale streamflow simulation using global optimization. Hydrol. Sci. J. des Sciences Hydrol. 53: 2. 293-308.

13.Kabir, A., Bahremand, A., Mahdavi, M., and Noora, N. 2011.Application of a geographical information system (GIS) based hydrological model for flow prediction in Gorganrood river basin, Iran. Afr. J. Agric. Res. 6: 1. 35-45.

14.Kuczera, G. 1983. Improved parameter inference in catchment models. 1. Evaluating parameter uncertainty. Water Resour. Res. 19: 5. 1151-1162.

Archive of SID

www.SID.ir

15.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, Pp: 317-326.
16.Liu, Y.B., Gebremeskel, S., De Smedt, F., Hoffmann, L., and Pfister, L. 2003. A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modeling, J. Hydrol. 283: 91-106.
17.Miller, W.A., and Cunge, J.A. 1975. Simplified equations of unsteady flow, In: K. Mahmood and V. Yevjevich (eds.), Unsteady flow in open channels, Water Resources Publications, Fort Collins, CO.
18.Muleta, M.K., and Nicklow, J.W. 2004. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model, J. Hydrol. 306: 127-145.
19.Saltelli, A. 2000. What is Sensitivity Analysis? in: Sensitivity Analysis, A. Saltelli, K. Chan and E. M. Scott (eds.), Wiley, Chichester, UK. Pp: 3-13.
20.Sorooshian, S., and Dracup, J.A. 1980. Stochastic parameter estimation procedures for hydrologic rainfall-runoff models:correlated and heteroscedastic errors. Water Resour. Res. 16 :2. 430-442.
21.van Griensven, A. 2002. Developments towards integrated water quality modeling for river basins, PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.
22.van Griensven, A., and Meixner, T. 2006. Methods to quantify and identify the sources of uncertainty for river basin water quality models. Water Sci. Technol. 53: 1. 51-5.
23.Wittenberg, H. 1999. Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes, Hydrol. Process. 13: 715-726.
24.Yang, J., Liu, Y., Yang, W., and Chen, Y. 2011. Multi-Objective Sensitivity Analysis of a Fully Distributed Hydrologic Model WetSpa. Water Resour. Manage. DOI 10.1007/s11269-011-9908-9.
25.Zeinivand, H., and De Smedt, F. 2008. Hydrological modelling of snow accumulation and melting on river basin scale. Water Resources Management Journal, DOI 10.1007/s11269-008-9381-2.
26.Zeinivand, H., and De Smedt, F. 2009a. Prediction of snowmelt floods with a distributed hydrological model using a physical snow mass and energy balance approach. Nat Hazards, DOI10.1007/s11069-009-9478-9.
27.Zeinivand, H., and De Smedt, F. 2009b. Spatially distributed modeling of soil erosion and sediment transport at watershed scale. In: Starrett, S. (Ed), Proceedings World Environmental and Water Resources Congress, May 17-21, American Society of Civil Engineers, Kansas City, Missouri: 6499-6508.

Archive of SID

www.SID.ir

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 20(5), 2013
http://jwsc.gau.ac.ir

Study uncertainty of parameters of rainfall-runoff model (WetSpa) by Mont carlo method

***A. Kabir[1] and A.R. Bahremand[2]**

[1]M.Sc. Graduate, Dept. of Watershed Management, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran, [2]Associate Prof., Dept. of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
Received: 10/04/2011; Accepted: 02/11/2013

Abstract

Studying and quantifying the uncertainty of the parameters of rainfall-runoff models have been raised mainly in the last decade and now is considered as one of the major challenges in international level. Despite the easy use of most conceptual rainfall-runoff models, due to the large number of parameters and lack of physical understanding of these models, use of them will be difficult in the calibration phase. In this study, uncertainty of the parameters of WetSpa model was investigated in Gorganrood catchment, Golestan province by Mont carlo method. WetSpa is a GIS-based distributed hydrological model that operates on catchment scale and has developed for flood prediction and watershed management. The model is physically based and simulates hydrological processes continuously both in time and space, for which the water and energy balance are maintained on each raster cell. Most of Uncertainties in model simulations results from the model structure and because some of the parameters have not properly defined. So for the correct prediction of runoff, uncertainty of the parameters and also forecast uncertainty should be taken into consideration. An appropriate parameter range was obtained by application of the Mont carlo method. The results show that the correction factor for measured evaporation data K_e has the highest relative sensitivity, because the margin of uncertainty of this parameter is the smallest, while parameters of g_0 and K_{rain} have the highest uncertainty.

Keywords: Rainfall-runoff model, WetSpa, Uncertainty, Mont carlo, Gorganrood

* Corresponding Author; Email: kabir_atena@yahoo.com

Archive of SID

www.SID.ir