واسنجی و تحلیل عدم قطعیت یک مدل نیمه توزیعی در یک منطقه نیمه‌خشک، مطالعه موردی حوضه آبریز نیشابور

مجتبی شفیعی*، حسین انصاری، کامران داوری و بیژن قهرمان[1]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۴/۱۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۶/۸)

چکیده

مطالعه چگونگی کاربرد مدل‌های مفهومی هیدرولوژی در حوضه‌های آبریز امروزه از مهم‌ترین مسائل مورد توجه محققان می‌باشد. این مسأله به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک از اهمیت بیشتری برخوردار است چون فرآیندهای هیدرولوژی این مناطق پیچیده‌تر و واسنجی نیز مشکل‌تر خواهد بود. در این تحقیق مدل مفهومی و نیمه‌توزیعی SWAT در حوضهٔ نیمه‌خشک نیشابور با مساحت ۹۳۵۰ کیلومترمربع برای شبیه‌سازی جریان در یک دوره ۸ ساله مورد استفاده قرار گرفته است. در فرآیند مدل‌سازی، حوضه آبریز نیشابور به ۲۲ زیرحوضه و در نهایت به ۱۴۶ واحد واکنش هیدرولوژیک (HRUs) تقسیم شد. برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت نیز از روش SUFI2 استفاده شده است. بررسی نتایج نشان داد که واسنجی و اعتبارسنجی مدل نسبتاً ضعیف به‌دست آمده است، که به سبب وجود عدم قطعیت در مدل مفهومی حوضه مانند احداث مخازن تغذیه مصنوعی، وقوع پدیده نشست زمین و شکاف در حوضه می‌باشد. هم‌چنین عامل مؤثر دیگر پیچیدگی سیستم هیدرولوژی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که مربوط به ساده‌سازی‌های این گونه مدل‌ها در شبیه‌سازی و تعامل پیچیده بین رواناب و جریان زیرسطحی در وقایع بارندگی با ارتفاع کم می‌باشد. به‌طور کلی به نظر می‌رسد که نمی‌توان از مدل‌های شبیه‌سازی توزیعی حوضه آبریز در مناطق خشک و نیمه‌خشک که دارای منابع متعدد عدم قطعیت می‌باشند و هم‌چنین عدم ورود آنها به مدل، انتظار زیادی داشت.

واژه‌های کلیدی: عدم قطعیت، SWAT، SUFI2، نیشابور

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: shafiei9@gmail.com

مقدمه

اغلب مدل‌های مفهومی (Conceptual model) بر انواع دیگر مدل‌های هیدرولوژیک، از جمله مدل‌هایی که بر مبنای فیزیکی (Physical base) هستند ترجیح داده می‌شوند چون مدل‌های مفهومی ضمن ارائه پاسخ‌های قابل قبول، به تلاش محاسباتی و داده‌های ورودی کمتری نیاز دارند. با این وجود واسنجی مدل‌های مفهومی که به صورت حل مسأله بهینه‌سازی از طریق مدل‌سازی معکوس است، در دهه‌های اخیر به عنوان یک چالش مطرح بوده است (۹). این مدل‌ها از تعدادی پارامتر برخوردارند که چکیده‌ای از ویژگی‌های حوضه هستند و اغلب این پارامترها از ویژگی‌های حوضه به‌دست نمی‌آیند و لازم است از راه واسنجی مدل برآورد شوند (۲۳).

بیشتر مدل‌های مفهومی و توزیعی هیدرولوژیک به ویژه نوع پیوسته آنها، از شمار زیادی پارامتر برخوردارند. به علت تعداد نسبتاً زیاد پارامترها و عدم وجود درک فیزیکی از آنها، این مدل‌ها در مرحله واسنجی پارامترها با مشکل مواجه‌اند. برخی از این پارامترها نیز دارای پشتوانه فیزیکی حوضه‌اند ولی برای کل سطح حوضه قابل اندازه‌گیری نیستند. این مسأله سبب شده که در واسنجی مدل حوضه، اغلب یافتن یک سری منحصر به فرد پارامترهای بهینه غیرممکن شود. بدین معنی که ممکن است سری‌های مختلف پارامترها نتایج یکسانی در روند مرحله واسنجی داشته باشند (۶). حتی در صورت واسنجی موفق مدل در یک دوره آماری با اطلاعات موجود (با فرض ناچیز بودن عدم‌قطعیت داده‌های ورودی و عدم‌قطعیت مدل مفهومی) عدم‌قطعیت پارامترها سبب می‌شود که شبیه‌سازی برای دوره خارج از دوره واسنجی کمتر قابل اطمینان باشد. مدل SWAT مدلی مفهومی، نیمه‌توزیعی و در مقیاس حوضه آبریز می‌باشد. این مدل در گام‌های زمانی ساعتی و روزانه قابل اجراست و قابلیت شبیه‌سازی تمامی مؤلفه‌های بیلان آب را دارد (۱۶). در مورد واسنجی مدل SWAT تا کنون مطالعات مختلفی بسیاری انجام شده است ولی کمتر مطالعه‌ای به اهمیت تحلیل عدم‌قطعیت و به کمیت درآوردن آن در واسنجی مدل حوضه توجه شده است. در حالی که واسنجی پارامترها و پیش‌بینی عدم‌قطعیت یک مدل کاملاً به یکدیگر وابسته‌اند و زمانی می‌توان از یک مدل هیدرولوژی توزیعی در مقیاس حوضه‌ای برای ارزیابی سناریوها استفاده کرد که علاوه بر واسنجی مطوب دارای عدم قطعیت قابل قبولی باشد، در این صورت می‌توان مدل را واسنجی شده نامید (۴).

روش‌های مختلفی برای تحلیل عدم قطعیت در مدل‌های توزیعی حوضه آبریز وجود دارد،از جمله GLUE (۸)، Parasol (۲۰)، MCMC (۲۱) و SUFI2 (۳ و ۵). برای انجام واسنجی و تحلیل عدم قطعیت توسط روش‌های مذکور برای مدل SWAT بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP توسعه یافته است (۵). عباس‌پور و همکاران(۴) اولین بار برنامه SUFI2 را جهت به کمیت درآوردن عدم‌قطعیت در تخمین جریان آب در خاک ارائه کردند. در مطالعه دیگری شول و عباس‌پور(۱۸)، برای واسنجی و تحلیل عدم‌قطعیت مدل SWAT در بخشی از غرب قاره آفریقا براساس دبی رودخانه‌ها از برنامه SUFI2 استفاده کردند و نتیجه گرفتند که SWAT می‌تواند در مقیاس‌های بزرگ پارامترهای بیلان آب را به کمیت در آورد و نیز SUFI2 یک ابزار بهینه‌سازی پارامترها و روش تحلیل عدم قطعیت مناسب می‌باشد که در آن تمامی عدم قطعیت‌ها (ورودی، پارامتر و مدل مفهومی) با یکدیگر ترکیب می‌شوند و به پارامترها نسبت داده می‌شوند به صورت ۹۵٪ پیش‌بینی عدم قطعیت بیان می‌شوند. هم‌چنین نتایج تحلیل عدم‌قطعیت آنها نشان داد که عدم‌قطعیت در مدل مفهومی در قاره آفریقا زیاد است و مرتبط به مخازن بزرگ است که موجب تأخیر در رواناب رودخانه نیجر و هم‌چنین منجر به تلفات زیاد تبخیر می‌شود. عباس‌پور و همکاران(۶) از مدل SWAT برای شبیه‌سازی تمام فرآیندهای مؤثر بر کیفیت آب، رسوب و چرخه غذایی حوضهٔ رودخانه تور در شمال شرقی کشور سویس با مساحتی در حدود ۱۷۰۰ کیلومترمربع استفاده کرده‌اند. در این مطالعه واسنجی مدل و تحلیل عدم قطعیت توسط روش SUFI2 و SWAT-CUP (رابط آن به مدل SWAT) انجام شد. توسط محاسبه دو پارامتر دقت واسنجی ارزیابی شد؛ ۱) درصد داده‌هایی که در باندهای

عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار دارند (P-factor)، یعنی با محاسبه مقادیر متناظر احتمال ۲/۵ درصد به عنوان حد پایین و ۹۷/۵ درصد به عنوان حد بالا در توزیع احتمال تجربی مربوط به متغیرهای شبیه‌سازی شده و ۲) پارامتر d-factor که حاصل نسبت میانگین فاصله بین چندک‌های بالا و انحراف معیار متناظر داده‌های اندازه‌گیری شده است، و نتیجه گرفتند که در حوضه مانند تور که دارای کیفیت خوب داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد، مدل دارای عدم قطعیت بسیار کمی می‌باشد و به راحتی می‌توان از مدل SWAT به عنوان یک مدل پیشرو در مطالعات مدیریت حوضه استفاده کرد. یانگ و همکاران(۲۵) چهار روش واسنجی مدل SWAT به نام‌های GLUE، MCMC، ParaSol و SUFI2 را برای حوضه‌ای در چین استفاده کردند. هر چهار روش نتایج مشابه را در برازش داده‌ها توسط معیارهای مختلف نشان دادند. اما همه آنها دامنه‌های متفاوتی از پارامترها را ارائه کردند، که این همان مسأله غیریگانگی معمول در واسنجی مدل‌های هیدرولوژی می‌باشد.

هم‌چنین در این مطالعه نتیجه گرفتند که برنامه SUFI2 در واسنجی مدل نیاز به اجرای کمتری در برآورد پارامترهای مدل دارد. فرامرزی و همکاران(۱۰) منابع قابل تجدید آب در ایران که از مهم‌رین اطلاعات در برنامه‌ریزی‌های بلند مدت ملی می‌باشد بررسی کرده‌اند، در این مطالعه مدل SWAT به همراه برنامه SUFI2 برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل هیدرولوژیکی ایران بر اساس دبی رودخانه‌ها و عملکرد گندم با در نظر گرفتن فعالیت‌های سدهای بزرگ استفاده شد. نتایج آنها برای اغلب رودخانه‌های بزرگ کشور رضایت‌بخش بود. نتایج این مطالعه نشان داد که عملیات آبیاری تأثیر معنی‌داری بر اجزاء بیلان آب استان‌های دارد. هم‌چنین دریافتند مناطقی که در آنها دخالت‌های بشر (ساخت سدها، مخازن، جاده‌ها، تونل‌ها و فعالیت‌های صنعتی) زیاد بوده، بدترین نتایج واسنجی و اعتبارسنجی را داشتند و پیش‌بینی‌های مدل دارای عدم قطعیت بیشتری بوده است. اخوان و همکاران (۱) نیز در حوضه همدان-بهار پس از واسنجی مطلوب SWAT توسط SUFI2، توزیع زمانی و مکانی مؤلفه‌ای بیلان آب را به همراه میزان عدم قطعیت ٪۹۵ آنها برآورد کردند. هدف از مطالعه حاضر اجرای مدل SWAT به همراه واسنجی و تحلیل عدم‌قطعیت نتایج مدل توسط برنامه SUFI2 در حوضه نیمه‌خشک نیشابور با مساحت ۹۳۵۰ کیلومترمربع در استان خراسان رضوی می‌باشد. به‌طوری که نتایج حاصل منجر به شناخت مدل مفهومی مورد استفاده در حوضه، ارتباط بین اجزای بیلان هیدرولوژیکی حوضه و هم‌چنین بررسی منابع عدم قطعیت در حوضه آبریز نسبتاً وسیع و نیمه‌خشک نیشابور خواهد شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

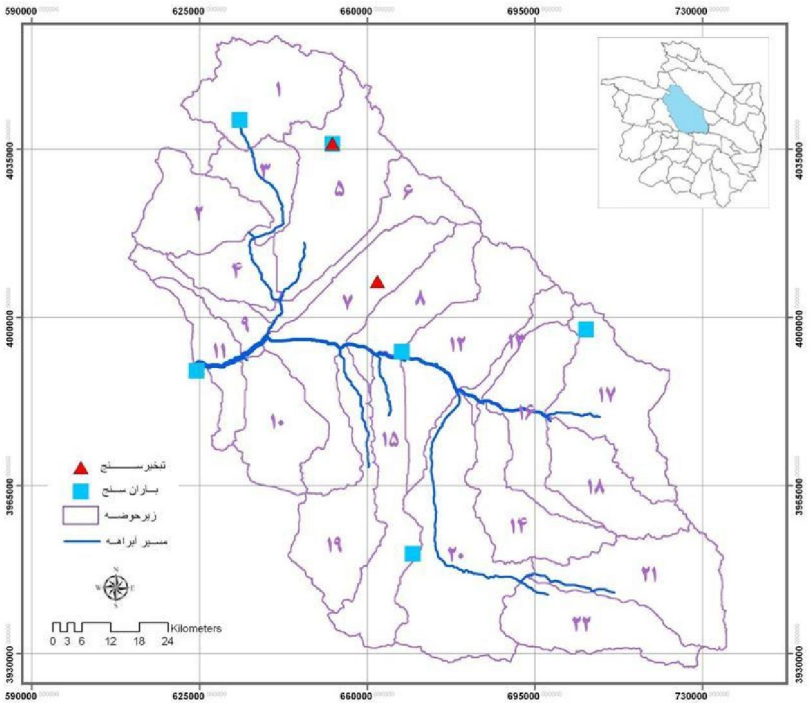
حوضه آبریز نیشابور با مساحت ۹۳۴۹ کیلومترمربع تقریباً در حد شرق حوضه آبریز کویر مرکزی در استان خراسان رضوی واقع شده است. متوسط بارندگی سالانه حوضه ۲۵۰ میلی‌متر است و مشخصات فیزیکی حوضه در جدول ۱ آورده شده است. شمال شرقی حوضه را ارتفاعات بینالود می پوشاند و به سمت غرب ارتفاع کم می شود و به دشت نیشابور و سپس خروجی حوضه منتهی می شود. در شکل ۱ موقعیت حوضه مذکور در استان خراسان رضوی نشان داده شده است.

مدل SWAT

مدل SWAT، مدلی در مقیاس حوضه آبریز است و شبیه‌سازی را در مقیاس روزانه انجام می‌دهد. ناهمگنی‌های مکانی در منطقه مورد مطالعه با تقسیم حوضه به زیرحوضه‌هایی بررسی می‌شود. زیرحوضه‌ها به تعدادی واحدهای کوچک‌تر که واحدهای واکنش هیدرولوژیک نامیده می‌شوند (Hydrologic Response Unit) تقسیم می‌شوند، این واحدها تا حد امکان مشابه هستند و دارای ترکیبات یکسانی از خاک، پستی و بلندی و پوشش گیاهی می‌باشند(۸ و ۲۳). بخش‌های اصلی مدل شامل هیدرولوژی، اقلیم، رشد گیاه، آفت‌کش‌ها، مدیریت اراضی و روندیابی جریان است. اجزای بیلان آب و مدیریت در سطح

جدول ۱. مشخصات فیزیکی حوضه

مساحت (کیلومترمربع)	محیط (کیلومتر)	حداکثر ارتفاع (متر)	حداقل ارتفاع (متر)	اختلاف ارتفاع (متر)	ارتفاع متوسط (متر)	شیب متوسط (درصد)
۹۳۴۹	۵۶۲	۳۳۰۵	۱۰۶۵	۲۲۴۰	۱۵۵۵/۷	۱۱/۴



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز نیشابور در استان خراسان رضوی به همراه ایستگاه‌های اقلیمی و زیرحوضه‌ها

واحدهای واکنش هیدرولوژیک محاسبه و سپس برای زیرحوضه‌ها میانگین گیری وزنی می‌شود. مدل SWAT برای داده‌های اقلیمی از نزدیک‌ترین ایستگاه به مرکز ثقل زیرحوضه استفاده می‌کند. روندیابی جریان توسط روش‌های ذخیره متغیر و ماسکینگام قابل محاسبه است. رواناب سطحی از بارندگی روزانه توسط روش شماره منحنی اصلاح شده محاسبه می‌شود (۱۶). ذوب برف روزانه در مدل زمانی روی می‌دهد که حداکثر دما از دمای آستانه‌ای که از قبل تعریف شده بیشتر شود. در مدل SWAT تبخیر از خاک و گیاه به طور جداگانه محاسبه می‌شود. تبخیر و تعرق پتانسیل توسط روش‌های پنمن- مونتیت، پریستلی- تایلور و هارگریوز می‌تواند صورت گیرد. پردازش و آماده‌سازی داده‌های ورودی مدل SWAT (مانند تشکیل زیرحوضه‌ها و واحدهای هیدرولوژیک و دریافت داده‌های مکانی مرتبط با آنها) در نرم‌افزار ArcGIS 9.2 با استفاده از برنامه الحاقی ArcSWAT انجام می‌شود (۲۲). رابط ArcSWAT در مقایسه با نسخه قبلی (برنامه AVSWAT در ArcView) هیچ‌گونه محدودیتی در مورد پیچیدگی و وسعت زیاد حوضه‌ها در شبیه‌سازی ندارد.

تحلیل عدم قطعیت و برنامه SUFI2

مدل‌های حوضه آبریز از عدم قطعیت‌های مختلفی برخوردار هستند. سه نوع اصلی عدم قطعیت در خروجی یک مدل

حوضه وجود دارد: عدم قطعیت ساختاری(مفهومی)، عدم قطعیت در ورودی و عدم قطعیت در پارامترهای مدل. عدم قطعیت ساختاری مربوط به فرض‌ها و ساده‌سازی‌های است که در فرآیندهای مدل صورت گرفته است. عدم قطعیت در ورودی و پارامترهای مدل به ترتیب مربوط به وجود خطا در داده‌های ورودی مدل مانند بارندگی و دماست و خطاهای مرتبط به غیریگانگی مجموعه پارامترهای مدل می‌باشد (۶).

در این تحقیق از روش SUFI2 جهت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت خروجی مدل SWAT استفاده شده است. روش SUFI2 با استفاده از عناصر روش GLUE در ترکیب با روش گرادیان (۱۴) اصلاح شده است و قادر است یک جستجوی سراسری (Global search) را در بهینه‌سازی پارامترها انجام دهد (۶). روش SUFI2 در مقایسه با سایر روش‌ها مانند GLUE و ParaSol نیازمند تکرارهای کمتری برای واسنجی مناسب و تحلیل عدم قطعیت دارد. توزیع عدم قطعیت در پارامتر به صورت توزیع یک‌نواخت فرض می‌شود و نمونه‌گیری (Sampling) از پارامترهای ورودی مدل که براساس دامنه تعیین شده آنها می‌باشد با روش لاتین هایپرکیوب (۱۵) انجام می‌شود.

الگوریتم بهینه‌سازی SUFI2 به این صورت است که در گام نخست تابع هدف تعریف می‌شود. در گام بعد محدوده‌های مجاز یا دامنه اولیه برای هر پارامتر تعیین می‌شود. در تعیین حدود اولیه بهتر است که تا حد امکان بزرگ و در عین حال معنی‌دار باشند. سپس با در نظر گرفتن حدود اولیه عدم‌قطعیت پارامترها، نمونه‌برداری به روش لاتین هایپرکیوب به تعداد زیاد انجام می‌شود. در هر بار نمونه‌گیری از حدود پارامترها، مقادیر انتخاب شده به مدل معرفی و اجرا می‌شود و متعاقباً مقدار تابع هدف محاسبه می‌گردد. بعد از هر بار نمونه‌گیری، اجرای مدل و محاسبه مقدار تابع هدف دامنه هر پارامتر کاهش می‌یابد، تا زمانی که دو شرط برآورده شوند: الف) اکثر داده‌های مشاهده‌ای در محدوده 95PPU واقع شوند و ب) متوسط حد بالا و پایین باند عدم قطعیت 95PPU کوچک شود. برقراری شرایط ذکر شده به کیفیت داده‌های اندازه‌گیری شده بستگی دارد. بنابراین در SUFI2 هدف در برگرفتن بیشترین مقادیر مشاهده شده با کمترین ضخامت باند می‌باشد.

در روش SUFI2، از یک برنامه واسط برای به هنگام کردن پارامترها در فایل‌های SWAT (SWAT-CUP) استفاده می‌شود. بنابراین مدل را می‌توان n بار با ترکیب n پارامتر به طور اتوماتیک اجرا کرد. ابتدا با عدم قطعیت بزرگ پارامترها شروع شد، SUFI2 چندین مرتبه اجرا شد تا به حل بهینه منجر شد. نتایج هر تکرار عدم قطعیت پارامترهای کوچک‌تری بود. میزان 95ppu محاسبه شده ارائه دهنده ترکیبی از عدم قطعیت پیش‌بینی مدل شامل عدم قطعیت پارامترها که نتیجه‌ای از غیریگانگی پارامترهای موثر مدل است، عدم قطعیت مدل مفهومی و عدم قطعیت ورودی می‌باشد. در SUFI2، تأثیر ترکیبی تمام عدم قطعیت‌ها توسط تخمین نهایی عدم قطعیت‌های پارامتر نشان داده می‌شود.

برای به کمیت در آوردن عدم قطعیت در روش SUFI2، ضرایب P-Factor و d-Factor را پیشنهاد شده است که به ترتیب برای به کمیت درآوردن قدرت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت می‌باشند. P-Factor درصدی از داده‌های مشاهده شده است که درمحدوده باند عدم قطعیت 95PPU قرار گرفته‌اند، با محاسبه مقادیر متناظر احتمال ۲/۵ درصد به عنوان حد پایین و ۹۷/۵ درصد به عنوان حد بالا در توزیع احتمال تجربی مربوط به متغیرهای شبیه‌سازی شده بدست آید. مقدار ایدآل P-Factor زمانی است که تمامی داده‌های مشاهده درمحدوده باند عدم قطعیت 95PPU قرار بگیرند ($P-factor \to ۱$). از طرف دیگر d-Factor برابر میانگین فاصله بین حدود بالا و پایین باند 95PPU است که با تقسیم بر انحراف معیار داده‌های مشاهده شده نرمال شده است (رابطه ۱).

$$d-factor = \frac{d_x}{\sigma_x} \qquad [۱]$$

که σx انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده و dx میانگین ضخامت باند عدم قطعیت 95PPU است. براساس تعریف d-Factor، بدیهی است که مقدار آن مستقیماً به بزرگی عدم

قطعیت خروجی‌های شبیه‌سازی شده مرتبط می‌شود. به عبارت دیگر بزرگی d-factor نشان‌دهنده بزرگ بودن عدم قطعیت است. مناسب‌ترین مقدار برای d-factor زمانی است که به صفر نزدیک باشد ($d-factor \to 0$).

تابع هدف انتخاب شده جهت واسنجی جریان در حوضه تابع φ می‌باشد که توسط کراس و همکاران (۱۵) ارائه شده است:

$$\varphi = \begin{cases} |b| R^2 & |b| \le 1 \\ |b|^{-1} R^2 & |b| > 1 \end{cases} \quad [2]$$

که R^2 ضریب تعیین بین دو سیگنال اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده می‌باشد و b شیب خط رگرسیون است. مقدار تابع φ بین ۰ و ۱ تغییر می‌کند و هرچه مقدار این تابع به ۱ نزدیک‌تر باشد نتایج دقیق‌تر خواهند بود.

داده‌های مورد استفاده و اجرای مدل SWAT

برای اجرای مدل SWAT، داده‌های هواشناسی در مقیاس روزانه مورد نیاز می‌باشد. با توجه به ایستگاه‌های موجود، برای اطلاعات بارندگی و دما به ترتیب از آمار ۶ و ۲ ایستگاه در حوضه استفاده شده است (شکل ۱). مدل SWAT برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژی حوضه از داده‌های اقلیمی نزدیک‌ترین ایستگاه به مرکز ثقل هر زیرحوضه استفاده می‌کند. در مدل این امکان وجود دارد که با تعریف باندهای ارتفاعی بتوان بارندگی شبیه‌سازی شده در زیرحوضه‌ها را تعدیل کرد به خصوص در شرایطی که تغییرات ارتفاعی در حوضه زیاد باشد. این کار در مدل با وارد کردن افت آهنگ تغییر دما و بارندگی نسبت به ارتفاع با ایجاد باندهای ارتفاعی در هر زیرحوضه به مدل معرفی می‌شود، که در این تحقیق به ترتیب مقادیر ۶ درجه سانتی‌گراد در هر کیلومتر و ۱۵۴ میلی‌متر در هر کیلومتر برای کل حوضه به همراه ۷ باند ارتفاعی لحاظ شده است (۳). در این تحقیق مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با تفکیک‌پذیری ۵۰ متر استفاده شده است که توسط درونیابی خطوط توپوگرافی رقومی با روش ANUDEM تولید شده است (۱۳). مقیاس نقشه کاربری اراضی و خاک حوضه آبریز نیشابور ۱:۱۰۰،۰۰۰ می‌باشند، به‌طوری که هر کدام به ترتیب دارای ۱۴ کاربری اراضی مختلف و ۴۱ نوع خاک با ویژگی‌های متفاوت می‌باشند (۳). لازم به ذکر است که پارامترهای فیزیکی مربوط به هر لایه از خاک (مانند هدایت هیدرولیکی اشباع) با توجه به درصد ذرات در هرلایه خاک توسط نرم افزار RetC (۱۹) تخمین زده شده است. در نهایت کلیه طبقات خاک و کاربری اراضی به صورت کدهای چهار حرفی به مدل معرفی شده‌اند.

برای اجرای مدل SWAT در حوضه آبریز نیشابور با توجه به محدودیت‌های موجود از قبیل کمبود در داده‌ها و عدم تطابق زمانی داده‌های روزانه درجه حرارت، بارندگی و هیدرومتری، یک دوره ۸ ساله انتخاب شد. اجرای مدل براساس گام زمانی روزانه از ۱ ژانویه ۱۹۹۲ تا ۳۱ دسامبر ۱۹۹۹ یا به عبارتی ۱۱ دی ماه ۱۳۷۰ الی ۱۰ دی ماه ۱۳۷۸صورت گرفت. در سال اول شبیه سازی، به مدل اجازه داده شد تا با شرایط اولیه متعادل (Warm up) شود. سال‌های بعدی برای واسنجی (۴ سال) و اعتبارسنجی (۳ سال) استفاده شده است. با توجه به نبود داده‌های اقلیمی روزانه تشعشع خورشیدی، رطوبت نسبی و سرعت باد از روش هارگریوز برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل در مدل استفاده شد. هم‌چنین از روش ماسکینگام برای روندیابی جریان در مدل استفاده گردید. در فرآیند پارامترسازی برای اجرای مدل SWAT در حوضه، توسط رابط مدل در ArcGIS (ArcSWAT) حوضه آبریز نیشابور به ۲۲ زیرحوضه (شکل ۱) و به جهت داشتن تفکیک مکانی بهتر، واحدهای واکنش هیدرولوژیک (HRU) به صورت چندگانه تعریف شدند، در نهایت حوضه به ۱۴۶ واحد واکنش هیدرولوژیک (HRU) تقسیم شد.

نتایج و بحث

نتایج واسنجی

پس از پارامترسازی و اجرای مدل، واسنجی توسط داده‌های ماهانه جریان در ایستگاه هیدرومتری خروجی حوضه، واقع در

زیرحوضه شماره ۱۱ صورت گرفت. در ابتدا ۲۹ پارامتر مرتبط با جریان رودخانه در خروجی حوضه و با توجه به مطالعات پیشین برای واسنجی انتخاب شدند سپس با انجام آنالیز حساسیت مطلق توسط SWAT-CUP (تغییر در یک پارامتر با ثابت بودن سایر پارامترها) تعداد ۲۰ پارامتر حساس برای حوضه نیشابور مشخص شد. جدول ۲ نوع پارامتر، حدود اولیه و نهایی آنها را در واسنجی را نشان می‌دهد. مدل برای واسنجی در ۵ بار تکرار و هر بار ۵۰۰ بار اجرا شد. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی در شکل ۲ به همراه مقادیر ضرایب P-factor و d-factor نشان داده شده است.

یکی از اهدافی که در SUFI2 دنبال می‌شود، کاهش عدم قطعیت می‌باشد به‌طوری که اکثر داده‌های مشاهداتی در سطح 95ppu قرار گیرند. عباس‌پور و همکاران گزارش کرده‌اند اگر داده‌های اندازه‌گیری شده از کیفیت خوبی برخودار باشند، باید ۱۰۰-۸۰ درصد آنها در سطح 95ppu قرار گیرند. اما در بعضی مناطق که داده‌ها از کیفیت مناسبی برخودار نیستند، کافیست که تنها ۵۰ درصد داده‌ها در سطح 95ppu قرار گیرند. معیارهای عملکرد R^2 و φ در واسنجی و اعتبارسنجی نیز به ترتیب ۰/۷۴، ۰/۷۳ و ۰/۴۲، ۰/۳۸ به‌دست آمده است. آنچه در نتایج مشهود است این است که مدل در شبیه‌سازی مقادیر دبی کم جریان، ضعیف عمل کرده است (به خصوص در سال‌های انتهایی واسنجی/ اعتبارسنجی)، به طور کلی مدل‌های شبیه‌سازی حوضه آبریز عملکرد ضعیفی در برآورد مقادیر کم جریان از خود نشان می‌دهند. این مشکل را می‌توان به ساده‌سازی‌های این گونه مدل‌ها در شبیه‌سازی و تعامل پیچیده بین رواناب و جریان زیرسطحی در وقایع بارندگی با ارتفاع کم دانست، همان‌طور که هانتوش و کلین(۱۲)، در تحقیقی نیز بدین مسأله اشاره کرده‌اند. هم‌چنین در حین واسنجی SWAT در مناطق خشک یا نیمه‌خشک آب‌های زیرزمینی کم‌عمق (آبخوان‌های سطحی که می‌تواند در تعامل با جریان رودخانه باشند) بسیار ناچیز هستند و این امر باعث می‌شود که جریان ورودی به رودخانه خیلی سریع باشد (۱۹). علاوه براین برداشت‌هایی که جریان‌های بالادست حوضه انجام می‌شود نیز ممکن است تأثیرگذار باشد. در شکل ۲ نقاطی مشاهده می‌شود (آوریل و می ۹۵، ۹۶) که مدل جریان‌های حداکثر را کمتر از حد واقعی تخمین زده است. اکثر جریان‌هایی که مدل قادر به شبیه‌سازی آنها نبوده است در ماه آوریل اتفاق افتاده که مصادف با فروردین ماه است. مدل SWAT، بارش را با استفاده از متوسط دمای روزانه به صورت باران یا برف تقسیم‌بندی می‌کند. با توجه به ضعف مدل در شبیه‌سازی رواناب ماهانه اسفند، فروردین و اردیبهشت و تقدم جریان شبیه‌سازی شده فروردین (آوریل و مارس) در بعضی سال‌ها، همانطور که در برخی از مطالعات قبلی نیز گزارش کرده‌اند (۱۰). می‌توان نتیجه گرفت که ممکن است مدل در شبیه‌سازی ذوب برف در کوهستان‌هایی که سرچشمه رودخانه کالشور قرار دارند، ضعیف عمل کرده است و جریانات حداکثر را خوب شبیه‌سازی نکرده است. دلیل دیگر رضایت‌بخش نبودن خروجی مدل علاوه بر موارد فوق، متأثر از طول کوتاه دوره آماری در واسنجی (۴ سال یا به عبارتی ۴۸ ماه) می‌باشد.

تحلیل عدم قطعیت

در پیش‌بینی‌های مدل‌های حوضه عدم قطعیت‌های زیادی وجود دارد که سه دسته‌اند، عدم قطعیت در مدل مفهومی (یا عدم قطعیت ساختاری)، در ورودی و در پارامترها به خصوص غیریگانگی آنها، که قبلاً اشاره شده است. همان‌طور که در بخش ۲-۳- ذکر گردیده مدل n بار و هر بار با ترکیب n پارامتر توسط روش SUFI2 و رابط SWAT-CUP اجرا می‌شود و هر بار عدم قطعیت پارامترها کاهش می‌یابد تا دو معیار الگوریتم SUFI2 برآورده شوند. در این مطالعه در اولین تکرار، حدود ۷۵ درصد از داده‌های مشاهداتی ماهانه در 95ppu قرار داشتند، اما مقدار d-factor بسیار بزرگ بود (۲/۹۲) که در نتیجه عدم قطعیت‌های بزرگ مدل بود. در تکرارهای بعدی برای دوره واسنجی d-factor به ۱/۴ کاهش یافت اما درصد داده‌های مشاهداتی که در 95ppu قرار دارند به ۶۷ درصد رسید، به عبارت دیگر اکثر داده‌های اندازه‌گیری شده در محدوده 95ppu

جدول ۲. پارامترهای واسنجی شده مدل به همراه حدود اولیه و حدود نهایی به‌دست آمده توسط روش SUFI2

پارامتر	توضیح	حدود اولیه	حدود نهایی
*r__CN2 _PAST	شماره منحنی (کاربری اراضی مرتع پرتراکم)	(۰/۵، ۰/۵-)	(۰/۰۵، ۰/۱-)
r__CN2 _RNGB	شماره منحنی (کاربری اراضی مرتع متوسط)	(۰/۵، ۰/۵-)	(۰/۱۷، ۰/۱)
r__CN2_MIXC	شماره منحنی (کاربری اراضی کشت مخلوط)	(۰/۵، ۰/۵-)	(۰/۰۸-، ۰/۱۸-)
r__CN2_CRDY	شماره منحنی (کاربری اراضی کشت دیم)	(۰/۵، ۰/۵-)	(۰/۰۵، ۰/۰۶-)
r__CN2_RNGE	شماره منحنی (کاربری اراضی مرتع کم تراکم)	(۰/۵، ۰/۵-)	(۰/۱۷، ۰/۰۸)
r__GW_DELAY	ضریب تاخیر آب زیرزمینی (روز)	(۰/۵، ۰)	(۰/۱۸، ۰/۰۲)
r__RCHRG_DP	درصد تغذیه آبخوان عمیق	(۰/۳، ۰/۳-)	(۰/۱۵، ۰/۱)
r__GWQMN	حداقل مقدار ذخیره شده آب در آبخوان که برای جریان پایه	(۰/۳، ۰/۳-)	(۰/۶۵-، ۰/۸-)
v__ALPHA_BF	ضریب عکس‌العمل جریان آب‌زیرزمینی	(۰/۶، ۰/۱)	(۰/۴، ۰/۲۴)
r__SOL_AWC	ظرفیت آب قابل دسترس خاک (mm/mm)	(۰/۳، ۰/۳-)	(۰/۱، ۰/۰۴-)
r__SOL_K	هدایت هیدرولیکی خاک (میلی‌متر بر ساعت)	(۰/۵، ۰/۵-)	(۰/۲۵، ۰/۱۲)
r__SOL_BD	چگالی ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	(۰/۲، ۰/۱)	(۰/۰۹، ۰/۰۲-)
v__ESCO	ضریب تصحیح تبخیر از خاک	(۱، ۰/۰۱)	(۰/۳۶، ۰/۲)
r__SLSUBBSN	متوسط طول شیب در هر HRU (متر)	(۰/۳، ۰/۳-)	(۰/۱۵، ۰/۰۶)
v__CH_N2	ضریب مانینگ آبراهه اصلی هر حوضه	(۰/۲، ۰/۰۱)	(۰/۱، ۰/۰۸)
v__CH_N1	ضریب مانینگ آبراهه فرعی	(۰/۲، ۰/۰۱)	(۰/۰۳۱، ۰/۰۱۷)
v__SFTMP	متوسط دمای هوا برای تبدیل باران به برف (درجه سانتی‌گراد)	(۵،۲)	(۲/۵، ۱/۶)
v__SMTMP	دمای ذوب توده برف (درجه سانتی‌گراد)	(۵،۳)	(۳/۶، ۲/۹)
v__MSK_CO1	ضریب واسنجی زمان ذخیره برای جریان نرمال در روش ماسکینگام	(۶،۰)	(۱/۷، ۰/۹)
v__MSK_CO2	ضریب واسنجی زمان ذخیره برای جریان کم در روش ماسکینگام	(۷،۰)	(۲/۹، ۲/۱)

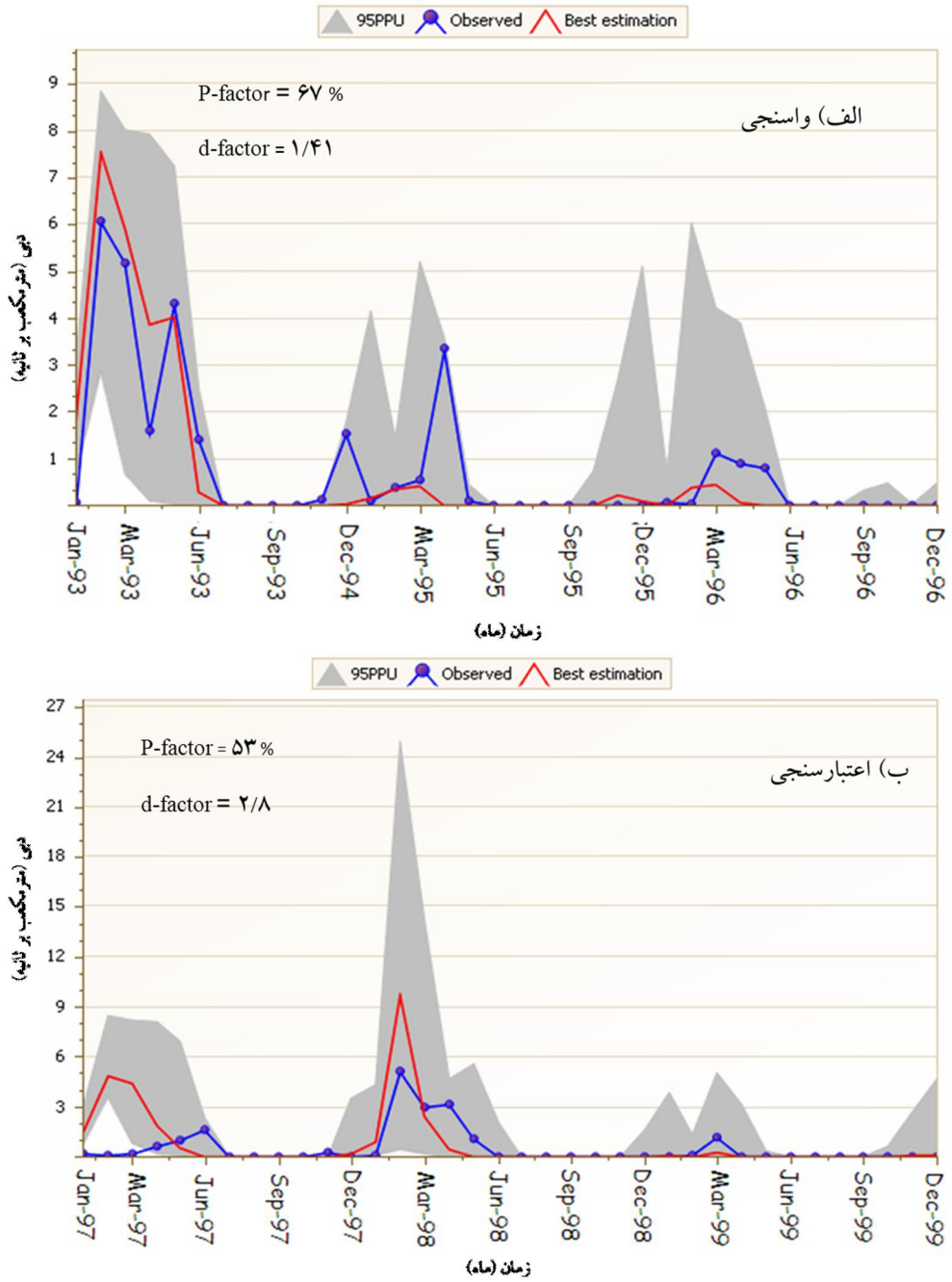
* r و v نشان‌دهنده تغییرات نسبی (ضرب در مقادیر پارامتر به صورت درصد) و مطلق (جایگزین مقادیر پارامتر) می‌باشند

قرار نگرفتند. که به خاطر عدم قطعیت‌های کوچک در پارامترها و عدم قطعیت زیاد در مدل مفهومی و ورودی‌ها می‌باشد. این نتیجه مشابه نتیجه تحقیق اسکول و عباس‌پور در غرب آفریقا است، به طوری که ضخامت باند عدم قطعیت زیاد (d-factor بزرگ) و این‌که درصد کمتری از داده‌های مشاهداتی در محدوده باند عدم قطعیت قرار گرفته است. بنابراین ضخامت باند 95ppu بزرگ (یا d-factor بزرگ) نشان‌دهنده عدم قطعیت در مدل مفهومی می‌باشد. بدین صورت که فرآیندها یا ناهمگنی‌هایی در حوضه در دوره شبیه‌سازی وجود داشته است (یا به وجود آمده است) که محقق از وقوع آن بی اطلاع بوده و در مدل وارد نشده و یا نمی‌تواند در مدل وارد شود. در مطالعه شول و عباس‌پور(۱۸) در غرب آفریقا علت آن وجود مخازن بزرگ در منطقه ذکر شده است. در این مطالعه با توجه به شناختی که از حوضه به‌دست آمده است، می‌توان موارد زیر را به ترتیب اهمیت و تأثیر آنها، نام برد:

۱. احداث مخازن تغذیه مصنوعی متعدد در سطح حوضه به‌خصوص در سرشاخه‌های حوضه.

۲. وقوع پدیده نشست و ایجاد شکاف زمین در غرب حوضه (۲ و ۳).

۳. حدود ۳۰ درصد از کاربری حوضه اراضی زراعت آبی و



شکل ۲. نتایج واسنجی (الف) و اعتبارسنجی (ب) جریان در خروجی حوضه نیشابور

باغی هستند و تبخیر و تعرق در حوضه زیاد است، به طوری که مدیریت‌های زراعی مانند آبیاری که به علت محدودیت‌ها وارد مدل نشده‌اند، ممکن است منجر به کاهش یا برآورد تبخیرو تعرق واقعی در حوضه شده باشند (۳).

۴. ضعف مدل SWAT در شبیه‌سازی ذوب برف، که قبلاً شرح داده شده است.

به‌طور کلی ساخت سدها، مخازن، جاده‌ها و تونل‌ها می‌تواند بر هیدرولوژی محلی منطقه در طولانی مدت تأثیر گذارباشد. این از مهم‌ترین و اغلب یکی از منابع فراموش شده عدم قطعیت در مدل‌سازی هیدرولوژیکی مقیاس‌های بزرگ

می‌باشد. همگام با افزایش توسعه در مدیریت منابع آب، مدل‌سازی هیدرولوژی سخت‌تر خواهد شد و به دسترس بودن جزئیات فعالیت‌های مدیریتی وابسته خواهد بود. سایر مطالعات انجام شده در ارتباط با کاربرد مدل‌های توزیعی در حوضه‌های خشک و نیمه‌خشک از جمله فرامرزی و همکاران(۱۰) و هانتوش و کالین(۱۲) نتایج نسبتاً مشابهی با این تحقیق داشته‌اند. اما وجود منابع متعدد عدم قطعیت در حوضه آبریز نیشابور و عدم لحاظ آن در مدل حوضه به سبب کمبود داده و شناخت صحیح آنها موجب شده تا نتایج کاربرد مدل SWAT در این حوضه رضایت‌بخش نباشد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SAWT در حوضه‌ی آبریز نیمه‌خشک نیشابور توسط روش SUFI2 انجام شده است. در حوضه‌ی نیشابور متوسط بارندگی و متوسط جریان رودخانه در دوره ۱۰ ساله به ترتیب ۲۵۰ میلی‌متر و ۰/۴۲ مترمکعب در ثانیه است. با توجه به این‌که داده‌های مکانی ورودی از جمله خاک، کاربری اراضی و DEM از دقت مناسبی برخوردار بودند، اما به سبب وجود عدم قطعیت‌های زیاد اعتبارسنجی مدل از دقت کمی برخوردار است، هرچند که نقش کوتاه بودن دوره شبیه‌سازی (۸ سال) را نیز نمی‌توان نادیده گرفت. به‌طور کلی به نظر می‌رسد که نمی‌توان از مدل‌های شبیه‌سازی توزیعی حوضه آبریز در مناطق خشک و نیمه‌خشک که دارای منابع متعدد عدم قطعیت می‌باشند و هم‌چنین عدم ورود آنها به مدل، انتظار زیادی داشت. البته عدم شبیه‌سازی درست دبی کم جریان در این حوضه‌ها که مربوط به ساده‌سازی‌های این گونه مدل‌ها در شبیه‌سازی و تعامل پیچیده بین رواناب و جریان زیرسطحی در وقایع بارندگی با ارتفاع کم می‌باشد نیز تأثیرگذار است. هم‌چنین در این مطالعه مهم‌ترین منابع عدم قطعیت که مربوط به مدل مفهومی حوضه می‌باشد در مدل‌سازی حوضه شناخته شده است که در آینده با در نظر گرفتن آنها می‌توان به‌طور قابل توجهی دقت مدل‌سازی را افزایش داد.

سپاسگزاری

این تحقیق بخشی از طرح پژوهشی تصویب شده در صندوق حمایت از پژوهشگران کشور ریاست جمهوری می‌باشد. بدین‌وسیله از این نهاد سپاسگزاری می‌شود.

منابع مورد استفاده

۱. اخوان، س.، ج. عابدی کوپایی، س. ف. موسوی، ک. عباس‌پور، م. افیونی و س. س. اسلامیان. ۱۳۹۰. تخمین آب آبی و آب سبز با استفاده از مدل SWAT در حوضه همدان-بهار. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک ۱۴(۵۳): ۲۹-۲۳.

۲. لشکری پور، غ.، م. غفوری، ر. کاظمی گلیان و م. دم شناس. ۱۳۸۶. نشست زمین در اثر افت سطح آب‌های زیرزمینی در دشت نیشابور، مجموعه مقالات پنجمین همایش زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران. صفحات ۱۰۹۱-۱۰۸۲.

۳. شفیعی، م. ۱۳۸۸. بیلان هیدرولوژیکی آب‌های سطحی توسط مدل SWAT و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی. پایانامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

4. Abbaspour, K.C., A.. Johnson, MTh. van Genuchten. 2004 Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. Vadose Zone J. 34:1340–1352.
5. Abbaspour, K.C. 2005. Calibration of Hydrologic Models: When is a Model Calibrated? International Congress on Modelling and Simulation, MODSIM05, Australia.
6. Abbaspour, K.C., J. Yang, I. Maximov, R. Siber K. Bogner, J. Mieleitner, J. Zobrist and R. Srinivasan. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre- alpine/alpine Thur watershed using SWAT. J. Hydrol. 3332-4: 413-430.

7. Abbaspour, K.C. 2009. User Manual for SWAT-CUP2, SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland. 95 pp.
8. Arnold, J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah and J.R. Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. J. Amer. Water Resour. Assoc. 341: 73-89.
9. Beven, K. and A. Binlley . 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. Hydrol. Proc. 63:279–298.
10. Faramarzi, M., K.C. Abbaspour, R. Schulin and H. Yang. 2009. Modelling blue and green water resources availability in Iran. Hydrol. Process 23: 486–501.
11. Fontaine, T.A., T.S. Cruickshank, J.G. Arnold and R.H. Hotchkiss. 2002. Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool SWAT. J. Hydrol. 2621-4: 209-223.
12. Hantush, M.M. and L. Kalin. 2005. Uncertainty and sensitivity analysis of runoff and sediment yield in a small agricultural watershed with kineros2. Hydrol. Sci. J. 506: 1151-1172.
13. Hutchinson, M.F. 2003. ANUDEM Version 4.6.3. Australian National University. Centre for Environmental Studies, Canberra.
14. Kool, J.B. and J.C. Parker. 1988. Analysis of the inverse problem for transient unsaturated flow. Water Resour. Res. 246:817–830.
15. Krause, P., D.P. Boyle and F. Base . 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. Adv. Geosci. 5: 89–97.
16. McKay, M.D., R. J. Beckman and W.J. Conover. 1979. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. Technometrics 21:239–245
17. Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry and J.R. Williams. 2005. Soil and water assessment tool, theoretical documentation Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment station and USDA Agricultural Research Service. Available online, www.brc.tamus.edu
18. Schuol, J. and K. C. Abbaspour. 2006. Calibration and uncertainty issues of a hydrological model SWAT applied toWest Africa. Adv. Geosci. 9: 137–143.
19. Sun, H. and P. S. Cornish. 2005. Estimating shallow groundwater recharge in the headwaters of the Liverpool Plains using SWAT. Hydrol. Process 19: 795-807.
20. Van Genuchten, M.TH., F.J. Leij and S.R. Yates. 1992. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Project summary, EPA'S Robert S. Kerr Environmental Research Lab., Ada ,OK, USA.
21. Van Griensven, A. and T. Meixner. 2007 A global and efficient multi-objective auto-calibration and uncertainty estimation method for water quality catchment models. J. Hydroinform. 94:277–291.
22. Vrugt, J.A., H.V.Gupta, W. Bouten and S. Sorooshian . 2003. A shuffled complex evolution metropolis algorithm for estimating posterior distribution of watershed model parameters. *In*: Duan, Q., S. Sorooshian, H.V. Gupta, A.N. Rousseau and R. Turcotte. (Eds.), Calibration of Watershed Models. AGU, Washington, DC. doi:10.1029/006WS07.
23. Winchell, M., R. Srinivasan, M. Di Luzio and J. Arnold. 2009. ArcSWAT 2.1.5 Interface for SWAT2005 User's Guide. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment station and USDA Agricultural Research Service. Available online, www.brc.tamus.edu
24. Yapo, P.O., H.V. Gupta and S. Sorooshian.1998. Multi-objective global optimization for hydrologic models. J. Hydrol. 204: 83-97.
25. Yang, J., P. Reichert , K.C. Abbaspour, J. Xia and H. Yang. 2008. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to Chaohe Basin in China. J. Hydrol. 358: 1–23.

Calibration and Uncertainty Analysis of a Semi-Distributed Model in a Semi-Arid Region, Case Study: Nishabour Watershed

M. Shafiei*, H. Ansari, K. Davari and B.Ghahraman[1]

(Received : July 4-2011 ; Accepted : Aug. 29- 2012)

Abstract

Application of conceptual hydrological models is an important issue in watersheds for researchers, especially in arid and semi-arid regions. The hydrological behaviors are complicated in such watersheds and their calibration is more difficult. In this article, the conceptual and semi-distributed SWAT model is used for a semi-arid Nishabour watershed with 9350 km^2 area. Streamflow simulation is considered for 8 years. Nishabour watershed modeling led to 22 subbasins and 146 Hydrologic response units. SUfI2 approach is used for calibration and uncertainty analysis of watershed modeling. Results showed that calibration and validation of watershed model is not satisfactory, because of uncertainties in conceptual model such as dam structures, and land subsidence. Another reason is related to the complexity of hydrological system in arid regions which has simplified in hydrological models. Moreover, the complex behavior between runoff and subsurface flow in low depth of rainfall events usually effects in hydrological simulation results. Finally, it concluded that we cannot rely on conceptual hydrologic models with different sources of uncertainty without including them in hydrological modeling at arid and semi-arid watersheds.

Keywords: Uncertainty, SWAT, SUFI2, Nishabour.

1. Dept. of Water Eng., College of Agric., Ferdowsi Univ. of Mashhad, Mashhad, Iran.
*: Corresponding Author, Email: Shafiei9@gmail.com