نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز
جلد ۵، شماره ۲، ۱۳۹۲، صفحات ۱۳۴-۱۴۳

Journal of Watershed Engineering and Management
Volume 5, Issue 2, 2013, Pages 134-143

شبیه‌سازی دبی، واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT، مطالعه موردی: حوضه بالادست سد لتیان تهران

هیوا عثمانی*[۱]، بهارک معتمدوزیری[۲] و ابوالفضل معینی[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی و [۲و۳] استادیار، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۱/۲۲ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۴/۱۲

چکیده

هدف اصلی در این پژوهش آزمون کارایی مدل ارزیابی آب و خاک (SWAT) و قابلیت استفاده از آن به‌عنوان شبیه‌ساز جریان و استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP و الگوریتم SUFI2 جهت واسنجی و اعتبار سنجی در حوضه بالادست سد لتیان تهران می‌باشد. اطلاعات مورد نیاز برای این پژوهش شامل نقشه‌های توپوگرافی، کاربری اراضی و اطلاعات خاکشناسی از اداره کل منابع طبیعی استان تهران و سازمان جنگل‌ها و مراتع و آبخیزداری کشور و با همکاری شرکت جهاد تحقیقات آب و انرژی، همچنین اطلاعات آب و هواشناسی شامل داده‌های روزانه بارش، دما و دبی جریان از سازمان هواشناسی و شرکت آب منطقه‌ای استان تهران و دفتر مطالعات پایه منابع آب کشور(تماب) تهیه شد. به‌منظور کارایی این مدل جهت شبیه سازی دبی، با مقایسه مقادیر شبیه‌سازی با ایستگاه هیدرومتری رودک واقع در خروجی حوضه در طول دوره آماری ۱۱ ساله (۲۰۰۷-۱۹۹۷) مشخص شد که مدل در شبیه‌سازی دبی‌های پیک به‌خوبی عمل نکرده است. در ادامه پژوهش ابتدا ۲۱ پارامتر موثردر جریان به نرم‌افزار SWAT-CUP وارد شد که پس از آنالیز حساسیت ۱۴ پارامتر برای واسنجی و اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفتند. واسنجی مدل برای سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۳ و اعتبارسنجی مدل برای سال‌های آماری ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۷ انجام گرفت. شاخص‌های ارزیابی مختلفی برای عملکرد مدل در نرم‌افزار SWAT-CUP و الگوریتم SUFI2 مورد استفاده قرار گرفت که شاخص‌های R_2، NS، P-factor و R-factor برای دوره واسنجی به‌ترتیب ۰/۹۱، ۰/۸۸، ۰/۹۶ و ۱/۷۹ و برای دوره اعتبارسنجی ۰/۹۲، ۰/۹۲، ۰/۹ و ۱/۵۴ به‌دست آمدند و ضریب آلفای آب زیرزمینی، ضریب تاخیر رواناب و چگالی ظاهری خاک به‌عنوان حساسترین پارامترها در میزان دبی خروجی شناخته شدند. در نهایت باتوجه به ارزیابی عملکرد مدل، شبیه‌سازی جریان در حوضه مورد مطالعه با توجه به کوهستانی بودن منطقه توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی، الگوریتم SUFI2، ایستگاه‌هیدرومتری‌رودک، نرم‌افزار SWAT-CUP

مقدمه

تغییر میزان بارش در نقاط مختلف کره‌زمین موضوع با اهمتی است، چرا که در بعضی مناطق ممکن است حتی تا چند سال هیچ‌گونه بارانی نبارد، در حالی‌که بعضی از مناطق، تا ارتفاع ۱۱ متر در سال باران دارند. در همین حال، توزیع بارش در فصول مختلف سال متفاوت است که گاهی منطبق با نیاز این فصول نیست.

* نویسنده مسئول: hiwa_osmani@yahoo.com

علم فرآیندی است که به دانسته‌ها و آگاهی‌های ما شکل منطقی و رسمی می‌دهد. یافته‌ها و دانش‌های غیر رسمی ابتدا به‌صورت فرضیه مطرح می‌شوند، سپس به وسیله مجموعه‌ای از دانشمندان و متخصصان آن رشته بررسی و ارزیابی می‌شوند. به کارگیری مدل-سازی شبیه‌سازی سابقه‌ای طولانی در تحقیقات علمی حوزه آبریز دارد. از این ابزار می‌توان برای ارزیابی تصمیمات مدیریت حوضه که مرتبط با مسائل اقتصادی است، استفاده کرد. امروزه سامانه اطلاعات جغرافیایی، ابزار معمول مورد استفاده در مدیریت آبریزها و منابع طبیعی است که با مجموعه‌های متعددی از بانک‌های اطلاعاتی مانند نقشه‌های رقومی ارتباط دارد. سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی برای پیش‌بینی نتایج فعالیت‌های مدیریتی، طراحی شده و توسعه یافته است. این ابزار برای تحت کنترل در آوردن شرایط سیستم بسیار کاراست. برای آگاهی از شرایط سیستم، بایستی که عوامل پویایی سیستم را به آن اضافه کنیم. مدل SWAT یک پنجره ارتباطی پیشرفته است که امکان تلفیق مجموعه‌ای از مدل‌ها و داده‌های GIS را در جریان آب سطحی و زیرزمینی و جریان آب رودخانه روندیابی می‌کنند، فراهم می‌سازد (Salajaghe و Aghamaleki، ۲۰۱۰). Abbaspour و همکاران (۲۰۰۷) از مدل SWAT برای شبیه‌سازی تمام فرآیندهای موثر بر کیفیت آب، رسوب و چرخه غذایی حوضه رودخانه تور در شمال‌شرقی کشور سوئیس با مساحتی در حدود ۱۷۰۰ کیلومترمربع استفاده کرده اند. این مطالعه نتایج بسیارخوبی برای شبیه‌سازی رواناب و نیترات و نتایج نسبتاً خوبی برای شبیه‌سازی دوهفته‌ای رسوب و کل فسفر داشت. در این مطالعه واسنجی مدل و تحلیل عدم قطعیت به‌وسیله روش SUFI2 انجام شد و با استفاده از محاسبه دو پارامتر دقت واسنجی ارزیابی شد.

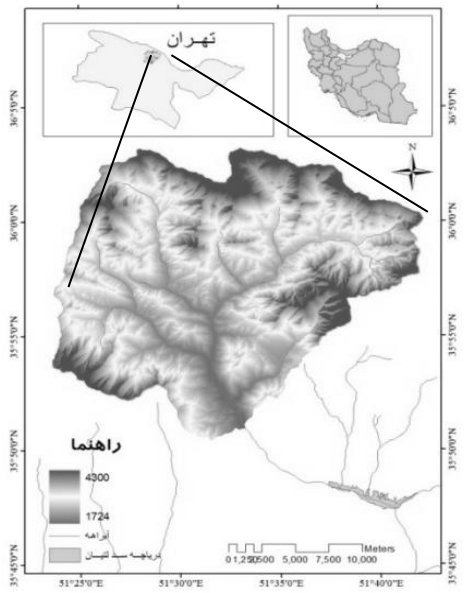
۱) درصد داده‌هایی که در باندهای عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار دارند، یعنی با محاسبه مقادیر متناظر احتمال ۲/۵ درصد به‌عنوان حد پایین و ۹۷/۵ درصد به‌عنوان حد بالا در توزیع احتمال تجربی مربوط به متغیرهای شبیه‌سازی شده و ۲) پارامتر d-factor که حاصل نسبت میانگین فاصله بین چندک‌های بالا و انحراف معیار متناظر داده‌های اندازه‌گیری شده است. این محققین نتیجه گرفتند که در حوضه‌ای مانند تور که دارای کیفیت خوب داده‌های اندازه‌گیری شده است، 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.

Omani و همکاران (۲۰۰۶)، برای شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل SWAT، مراحل واسنجی و اعتبارسنجی را برای دو زیرحوضه ماهیدشت و سنجابی در حوضه رودخانه کارون با استفاده از اطلاعات مشاهده‌ای دو ایستگاه هیدرومتری واقع در خروجی زیرحوضه‌ها به‌صورت جداگانه انجام داده‌اند. واسنجی مدل، مقدار ضریب R_2 شبیه‌سازی جریان ماهانه دو حوضه ماهیدشت و سنجابی را به‌ترتیب ۸۹ و ۸۱ درصد، و اعتبارسنجی مدل، مقدار R_2 را به‌ترتیب ۹۰ و ۸۷ درصد نشان داد. Akhavan و همکاران (۲۰۱۰) از مدل SWAT برای تخمین مولفه‌های منابع آبی در حوزه آبخیز بهار همدان استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی در بیشتر ایستگاه‌ها، به‌ویژه خروجی حوزه آبخیز (ایستگاه کوشک‌آباد) رضایت‌بخش بود. نتایج نشان داد که مقادیر R-factor در مرحله واسنجی رواناب ماهانه بین ۰/۴ تا ۰/۸ و مقادیر p-factor بین ۲۰ تا ۶۰ درصد بودند. ضریب تبیین (R_2) کلیه ایستگاه‌ها بعد از واسنجی بین ۰/۴ تا ۰/۸ قرار گرفت. Maghrebi و همکاران (۲۰۱۰) از مدل SWAT به‌منظور مدل‌سازی سیر و حرکت باکتری کلیفرم مدفوعی در رودخانه جاجرود استفاده کردند. نتایج مدل‌سازی نشان‌دهنده نقش مهم فاضلاب انسانی و تاثیر جزئی فضولات حیوانی در تولید آلودگی میکروبی رودخانه می‌باشد. در پژوهش حاضر تلاش شده است با استفاده از ورودی‌های موجود برای اجرای مدل علاوه بر شبیه‌سازی دبی در ایستگاه هیدرومتری رودک، در دوره واسنجی و اعتبارسنجی مقادیر پارامترهای موثر در دبی جریان بااستفاده از الگوریتم SUFI2 تعدیل شوند و حساس‌ترین آن‌ها نیز شناسایی شود.

مواد وروش‌ها

منطقه مورد پژوهش: حوزه آبخیز سد لتیان در فاصله ۳۵ کیلومتری شمال شرق شهر تهران، بین

عرض جغرافیایی '۴۵ °۳۵ تا '۵ °۳۶ شمالی و طول جغرافیایی '۲۳ °۵۱ تا '۵۱ °۵۱ شرقی قرار دارد. سد لتیان یکی از منابع اصلی تامین‌کننده آب شرب شهر تهران محسوب می‌شود و حدود ۲۵٪ آب شرب تهران از این منبع تامین می‌شود. رودخانه جاجرود مهم‌ترین رودخانه این حوضه محسوب شده و علاوه بر نقش تامین آب مخزن سد و در نهایت آب شرب شهر تهران، مورد استفاده تفرجگاهی فراوان مردم نیز قرار می‌گیرد. از طرف شمالی این حوضه سه انشعاب مهم رودخانه جاجرود شامل گرمابدر، شمشک و آهار و در میانه آن رودخانه امامه و انشعاباتی از اوشم و رودک به آن متصل و به دریاچه سد لتیان می‌ریزند. حوضه مورد پژوهش بالادست سد لتیان با مساحت حدود ۴۲۴/۶ کیلومتر مربع، منطقه‌ای سردسیر بوده که از آذرماه به بعد بارش‌ها به‌صورت برف است. دمای ماهانه تابستان بین ۱۴ تا ۲۶ درجه سانتی‌گراد و در زمستان بین ۶- تا ۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میانگین بارش سالانه حوضه برابر ۷۲۰ میلی‌متر است. بیشترین مقادیر بارش در ماه‌های بهمن تا اردیبهشت در سطح حوضه رخ می‌دهد. شکل ۱ موقعیت حوضه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت حوضه مورد پژوهش

مدل SWAT یک مدل نیمه توزیعی برای شبیه‌سازی حرکت آب، رسوب، مواد غذایی و سموم در سطح حوضه می‌باشد. پایه و اساس این مدل، رابطه بیلان آب می‌باشد و نیاز به داده‌های ورودی از جمله اقلیم، خصوصیات خاک، وضعیت توپوگرافی حوضه، پوشش گیاهی، کاربری اراضی و مدیریت حوضه دارد.

محاسبه رواناب سطحی در مدل SWAT: رواناب سطحی زمانی رخ می‌دهد که میزان آب‌های سطحی نسبت به میزان نفوذ آب افزایش یابد. زمانی‌که میزان بارش از میزان نفوذ بیشتر شود، گودال‌های سطح زمین شروع به پر شدن می‌کنند. اگر که سرعت بارش تداوم داشته باشد و به مقداری بیش از مقدار نفوذ برسد تا زمانی‌که تمام گودال‌های سطحی پر شوند رواناب سطحی شروع به حرکت می‌کند.

برای شبیه‌سازی رواناب سطحی دو روش در SWAT وجود دارد:

الف) روش منحنی SCS: در این روش شماره منحنی خاک و مقدار نفوذ و آب موجود در خاک نقش اساسی دارند.

ب) روش گرین آمپ: در این روش اساس محاسبات رواناب، داده‌های بارش و هدایت هیدرولیکی می‌باشد.

روش منحنی SCS: رابطه رواناب SCS یک مدل تجربی است که در سال ۱۹۵۰ به‌وسیله سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) مورد استفاده قرار گرفت. این رابطه پس از ۲۰ سال مطالعات روابط بارندگی از حوضه‌های زراعی کوچک در آمریکا برای تخمین مقادیر رواناب در اراضی مختلف با انواع خاک‌ها بسط داده شده است.

$$Q_{surf} = (R_{day} - 0.2S)^2 / (R_{day} - 0.8S) \qquad (۱)$$

که در آن، Q_{surf} ارتفاع رواناب (میلی‌متر)، R_{day} - ارتفاع باران (میلی‌متر)، Ia نگه‌داشت اولیه شامل سطحی، برگاب و نفوذ قبل از رواناب (میلی‌متر) و S پارامتر نگه‌داشت (میلی‌متر) می‌باشد. پارامتر نگه‌داشت از نظر مکانیکی به‌علت تغییرات در خاک، کاربری اراضی، مدیریت و شیب و از نظر زمانی به‌علت تغییر در مقدار آب و خاک در واحدهای مختلف متغیر می‌باشد و از رابطه (۲) به‌دست می‌آید.

$$S = 25.4\left[(1000/CN) - 10\right] \qquad (۲)$$

که در آن، CN عدد شماره منحنی می‌باشد. عدد منحنی SCS تابع نفوذپذیری خاک، کاربری اراضی و شرایط رطوبت خاک است. اعداد منحنی بسته به

پوشش مختلف زمین و انواع خاک‌ها متفاوت هستند. اغلب، مقدار نگه‌داشت اولیه Ia برابر با ۰/۲ در نظر گرفته می‌شود ($Ia = 0.2S$) و رواناب زمانی اتفاق می‌افتد که $Ia < R_{day}$ باشد.

روش نفوذپذیری گرین و آمپت: برای تعیین رواناب سطحی در SWAT از روش گرین و آمپت و لارسون و مین استفاده شده است. میزان نفوذپذیری از روش لارسون-مین و گرین- آمپت به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$F_{\inf t} = K_e \times (1 + \frac{\psi_{\omega f} + \Delta\theta_v}{F}) \qquad (۳)$$

که در آن، $F_{\inf t}$ مقدار نفوذپذیری در واحد زمان (میلی‌متر بر ساعت)، K_e هدایت هیدرولیکی موثر (میلی‌متر بر ساعت)، $\psi_{\omega f}$ پتانسیل ماتریک جبهه رطوبتی (میلی‌متر)، $\Delta\theta_v$ تغییرات رطوبت حجمی رطوبتی (میلی‌متر) و Finf,t نفوذپذیری تجمعی در زمان بر حسب (میلی‌متر) می‌باشد (USER MANUAL SWAT، ۲۰۰۵).

محاسبه بیلان آبی در مدل SWAT: چرخه هیدرولوژی از طریق SWAT براساس رابطه موازنه آبی شبیه‌سازی شده است.

$$SWt = SWo + \sum_{i=1}^{t}(R_{day} - Q_{surf} - Ea - w_{seep} - Q_{gw}) \qquad (۴)$$

که در آن، SWt حجم نهایی آب در خاک (میلی‌متر آب)، SWo حجم اولیه آب در خاک در روز (میلی‌متر آب)، R_{day} مقدار بارندگی روزانه (میلی‌متر آب)، Q_{surf} میزان رواناب سطحی روزانه (میلی‌متر آب)، Ea میزان تبخیر و تعرق روزانه (میلی‌متر آب)، w_{seep} میزان آب ورودی از نواحی اطراف به پروفیل خاک (میلی‌متر آب) و Q_{gw} مقدار تراوش بازگشتی روزانه آب (میلی‌متر آب) می‌باشد.

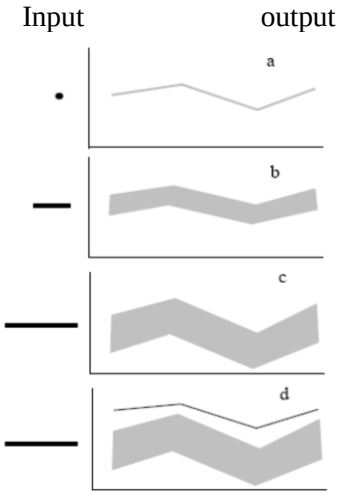
این مدل قابلیت انعکاس اختلاف تبخیر و تعرق محصولات گوناگون و خاک را در زیر حوضه‌های یک حوزه آبریز دارد. رواناب‌ها در هر واحد پاسخ هیدرولوژیک (HRU) و هر مسیر، برای به‌دست آوردن رواناب کل، به‌طور مجزا پیش‌بینی می‌شوند. این افزایش دقت و صحت منجر به تشریح بهتر موازنه فیزیکی آب می‌شود (Neitsch و همکاران، ۲۰۰۵).

تحلیل حساسیت، واسنجی، اعتبارسنجی و کارایی مدل: در ArcSWAT، امکانات مستقلی برای تحلیل حساسیت و عملیات واسنجی در نظر گرفته شده است. اما به‌منظور صرفه‌جویی در وقت و بهبود کیفیت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت در نتایج مدل از روش SUFI2، در نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده شد. برنامه SUFI2 واسنجی و عدم قطعیت را ترکیب کرده و سعی می‌کند پارامترهای عدم قطعیت را به نحوی تعیین کند که اکثر داده‌های مشاهده‌ای در ناحیه عدم قطعیتِ تعیین شده قرار گیرند. در عین حال سعی می‌کند، کوچک‌ترین طیف عدم قطعیت ممکن را ایجاد نماید. در این نرم‌افزار، یک دامنه بزرگ اولیه عدم قطعیت برای هر پارامتر فرض می‌شود. بنابراین در ابتدا، داده‌های مشاهده‌ای در سطح PPU ۹۵ قرار می‌گیرند، سپس این عدم قطعیت در گام‌های متوالی، کاهش می‌یابد تا دو شرط زیر برقرار شود:

۱- اکثر داده‌های مشاهده‌ای در سطح PPU ۹۵ واقع شوند ($P - factor \to 1$).

۲- فاصله متوسط بین حد بالا و پایین، در طیف ۹۵ درصد عدم قطعیت تقسیم بر انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده تا حد ممکن کوچک شود ($R - factor \to 0$).

در سال‌های اخیر مدل‌سازی معکوس (IM) روشی معمول برای کالیبراسیون مدل‌ها شده است. از آن‌جایی‌که انتخاب مقادیر مختلف برای پارامتراسیون و کالیبراسیون مدل محدود بوده و روشی وقت‌گیر و پرهزینه است، مدل‌سازی معکوس، جایگزین مناسب برای کالیبراسیون مدل و انتخاب مقادیر مناسب برای پارامترها می‌باشد. SUFI یک مدل معکوس است که برای کالیبراسیون و تحلیل عدم قطعیت استفاده می شود. این مدل در واقع معکوس مدل SWAT عمل می‌کند و با گرفتن داده‌های مشاهداتی (دراین پژوهش دبی جریان) به‌عنوان ورودی (خروجی مدل SWAT) و همچنین، محدوده مجاز پارامترهای مدل SWAT که در کالیبره نمودن مدل نسبت به حوضه مطالعاتی نقش دارند، مانند شماره منحنی خاک و بسیاری پارامترهای دیگر، میزان بهینه پارامترهای مذکور را برآورد می‌نماید(Abbaspour، ۲۰۰۹).



شکل ۲- مفهوم عدم قطعیت

برای ارزیابی کارایی مدل و برای به‌دست آوردن بهترین واسنجی و محدود کردن جواب‌ها به‌سمت جواب یگانه، گاهی لازم است چندین روش آماری مورد استفاده قرارگیرد. در این پژوهش ارزیابی مدل به‌کمک ضریب NS (ناش-ساتکلیف) و ضریب هم‌بستگی (تبیین) (R_2) انجام می‌گیرد.

ضریب (NS): NS ضریبی است که اختلاف نسبی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. محققین مختلف از این شاخص برای ارزیابی مدل‌ها استفاده کرده‌اند. این ضریب به‌طریق زیر محاسبه می‌شود:

$$NS = 1 - \left[\sum_{i=1}^{n} (O_i - P_i)^2 / \sum_{i=1}^{n} (O_i - \bar{O})^2 \right] \quad (۵)$$

که در آن، O_i مقادیر مشاهده شده، P_i مقادیر شبیه‌سازی شده و $\bar{O}$ میانگین مقادیر مشاهده شده می‌باشد. مقدار این ضریب بین یک تا منفی بی‌نهایت تغییر می‌کند. بهترین مقدار برای ضریب NS یک است و در صورتی‌که میزان آن بیشتر از ۰/۵ باشد، نشان‌دهنده این است که شبیه‌سازی با استفاده از مدل خوب است.

ضریب هم‌بستگی (R_2): ضریب تشخیص یا تبیین، نشان‌دهنده قسمتی از تغییرات کل (یا واریانس کل) مقادیر مشاهده‌ای است که به‌وسیله مقادیر شبیه‌سازی شده توجیه می‌شود. آماره R_2 نسبت پراکندگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. R_2 بین صفر تا یک متغیر است، چنانچه مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برابر باشند، مقدار آن برابر یک می‌باشد.

$$R^2 = \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^{n} (O_i - \bar{O}) \times (P_i - \bar{P}) \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (O_i - \bar{O})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (۶)$$

که در آن، n تعداد مشاهدات، O_i و P_i مقادیر متناظر مشاهده و پیش‌بینی شده، $\bar{O}$ و $\bar{P}$ نیز میانگین ریاضی مقادیر مشاهده و پیش‌بینی شده است. ضریب هم‌بستگی نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر پیش‌بینی و مشاهده شده تا چه میزان به حداکثر مقدار هماهنگی بین این دو سری مقدار نزدیک است و از صفر تا یک تغییر می‌کند (Abbaspour، ۲۰۰۹).

داده‌های مورد استفاده : داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل داده‌های مکانی و داده‌های عددی و هیدروکلیماتولوژی می‌باشد. لایه‌های GIS شامل: لایه‌های مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک ۱۰ متر، لایه کاربری اراضی و خاک منطقه که از اداره کل منابع طبیعی استان تهران و با همکاری شرکت جهاد تحقیقات آب و انرژی تهیه شدند. لایه کاربری اراضی شامل پنج نوع کاربری بود. لایه اطلاعات خاک منطقه به ۱۱ واحد خاک تقسیم‌بندی شد (شکل ۳).

شکل ۳- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی

شیب منطقه مورد مطالعه به پنج طبقه تقسیم‌بندی شد. داده‌های عددی و هیدروکلیماتولوژی شامل داده‌های مربوط به ایستگاه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه می‌باشد که از سازمان هواشناسی کشور و شرکت توسعه منابع آب ایران (تماب) تهیه شده‌اند. در جدول ۱ ایستگاه‌های آب و هواشناسی مورد استفاده و مشخصات هر یک از آن‌ها و در شکل ۳ موقعیت ایستگاه‌ها در حوضه مورد مطالعه آورده شده است. از ایستگاه سینوپتیک شمال تهران نیز به‌عنوان ایستگاه مرجع هواشناسی استفاده شده است.

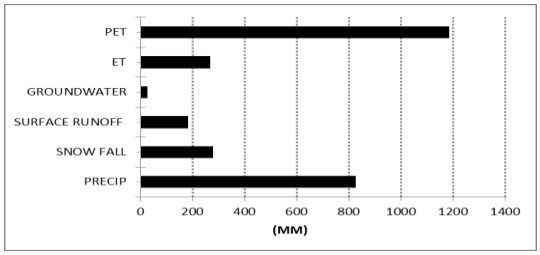
جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی

ایستگاه	نوع	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)
رودک	بارانسنجی	۵۱° ۳۳ '	۳۳° ۵۱ '	۱۷۱۰
گرمابدر	بارانسنجی	۵۱° ۳۷ '	۳۵° ۵۹'	۲۵۰۰
آهار	بارانسنجی	۵۱° ۲۸ '	۳۵° ۵۶ '	۲۱۰۰
شمشک	بارانسنجی	۵۱° ۳۰ '	۳۶° ۰۰ '	۲۷۰۰
امامه	دماسنجی	۵۱° ۳۴ '	۳۵° ۵۴ '	۲۲۴۸
گلوگان	دماسنجی	۵۱° ۳۲ '	۳۵° ۵۲ '	۱۸۹۵
رودک	هیدرومتری	۵۱° ۳۳ '	۳۳° ۵۰ '	۱۷۱۰
شمال‌تهران	سینوپتیک	۵۱° ۳۷ '	۳۵° ۴۷ '	۱۵۴۸

نتایج و بحث

در ArcSWAT منطقه مورد مطالعه به ۲۱ زیرحوضه تقسیم شد. به‌دلیل وجود تنوع در نقشه کاربری اراضی و خاک و برای اطمینان از داشتن تفکیک‌پذیری بالا، واحدهای واکنش هیدرولوژیک[1] به‌صورت چندگانه برای هر زیرحوضه تعریف شدند و این کار با تعیین حداقل پنج درصد سطح برای طبقه‌های کاربری اراضی، خاک و برای طبقات شیب صورت گرفت و در نهایت حوضه به ۲۹۳ واحد هیدرولوژیک تقسیم شد. در ادامه برای واسنجی و اعتبارسنجی، ابتدا ۲۱ پارامتر موثر در جریان با توجه به منطقه مورد مطالعه انتخاب و مقادیر اولیه آن‌ها به نرم‌افزار SWAT-CUP2009(Version2) وارد شد.

شکل ۴ متوسط سالیانه مولفه‌های بیلان آبی شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل SWAT را در طول دوره آماری نشان می‌دهد.



شکل ۴- متوسط سالیانه مولفه‌های بیلان آبی شبیه‌سازی شده (۱۹۹۷-۲۰۰۷)

پس از یک تکرار ۵۰۰تایی و باستفاده از الگوریتم SUFI2، ۱۴ پارامتر که حساسیت بیشتری داشتند، انتخاب شدند. جدول ۲ پارامترهای مورد استفاده موثر در دبی جریان را در دوره واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد. هنگام استفاده از الگوریتم SUFI2 در اولین مرحله بایستی تابع هدف معرفی شود. مطالعات متفاوت نشان می‌دهد که رابطه‌های متفاوتی برای تابع هدف وجود دارند و هر رابطه نتایج متفاوتی به‌دست می‌آورد و تابع منحصر به فردی وجود ندارد (Abbaspour، ۲۰۰۹).

در پژوهش حاضر از تابع هدف NS استفاده شد. شکل‌های ۵ و ۶ نتایج شبیه‌سازی دبی در دوره واسنجی (۲۰۰۳-۱۹۹۷) و دوره اعتبارسنجی (۲۰۰۷-۲۰۰۴) را در کنار نمودار باند عدم قطعیت نشان می‌دهند. نتایج حساسیت پارامترها در آخرین تکرار در اجرای برنامه SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CUP به‌دست آمد.

در آنالیز حساسیت مقدار متوسط تغییرات تابع هدف در اثر تغییرات در هر پارامتر محاسبه می‌شود، که سایر پارامترها در حال تغییراند و حساسیت پارامترهای مختلف با استفاده از آزمون t تست نشان داده می‌شود و بستگی به دامنه پارامترها دارد. در جدول ۳ مقادیر اولیه و نهایی پارامترها و در جدول ۴ نتایج حاصل از تحلیل حساسیت پارامترها آورده شده‌است.

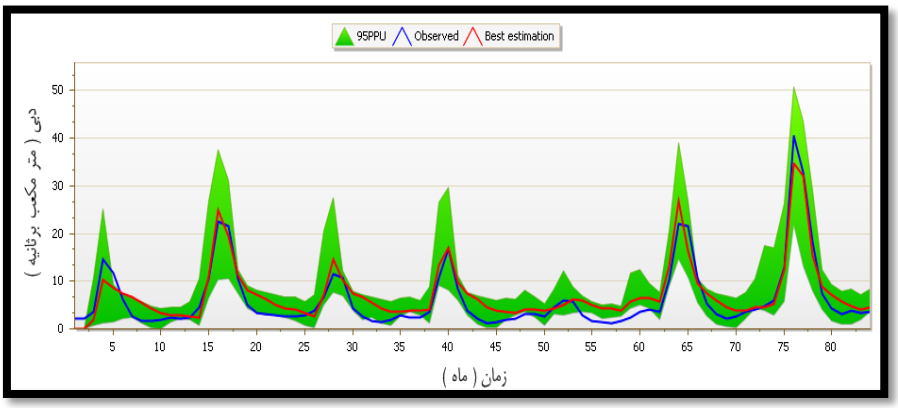
در آنالیز حساسیت پارامترها، پارامتری که قدر مطلق مقدار t آن بیشتر باشد، از حساسیت بیشتری برخوردار است و مقدار p، معنی‌دار (p-value) بودن حساسیت را نشان می‌دهد، که هرچه به صفر نزدیک‌تر

[1] Hydrologic Response Units (HRU)

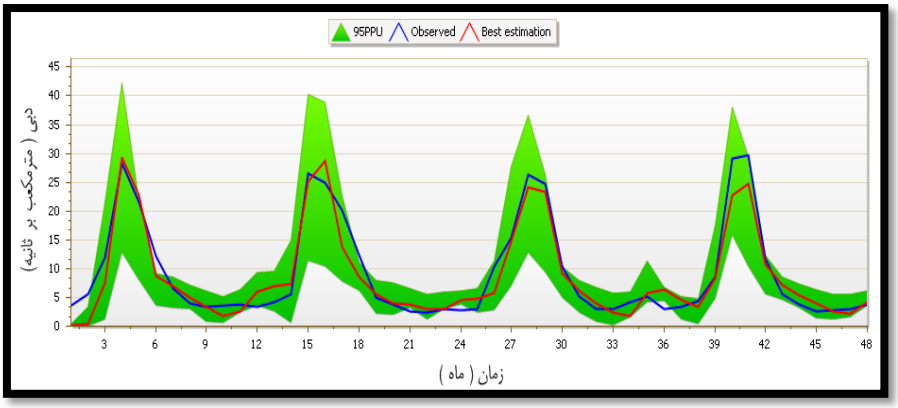
باشد، معنی‌دارتر می‌باشد. نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی در نرم‌افزار SWAT-CUP و با استفاده از الگوریتم SUFI2 در جدول ۵ آمده است.

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده جهت واسنجی و اعتبارسنجی

ردیف	نام پارامتر	شرح پارامتر
۱	v__ALPHA_BF.gw	ضریب عکس‌العمل جریان آب زیرزمینی
۲	r__ESCO.hru	ضریب تصحیح تبخیر از خاک
۳	v__OV_N.hru	ضریب مانینگ جریان سطحی
۴	r__SOL_BD(1).sol	چگالی ظاهری خاک (g/cm^2)
۵	v__SMFMN.bsn	نرخ ذوب برف در ۲۱ دسامبر (mm/C-day)
۶	v__GWQMN.gw	حداقل مقدار ذخیره شده آب در آبخوان که برای رخ دادن جریان پایه لازم است.(mmH_2O)
۷	v__CH_K2.rte	هدایت هیدرولیکی موثر در کانال اصلی (mm/hr)
۸	v__TIMP.bsn	ضریب تاخیر زمانی برای توده برف
۹	v__CH_N2.rte	ضریب مانینگ آبراهه اصلی
۱۰	v__SURLAG.bsn	ضریب تاخیر رواناب
۱۱	r__SOL_AWC(1).sol	ظرفیت آب قابل دسترس خاک (mm/mm)
۱۲	v__SFTMP.bsn	متوسط دمای هوا برای تبدیل باران به برف (درجه سانتیگراد)
۱۳	v__SMFMX.bsn	نرخ ذوب برف در ۲۱ ژوئن (mm/C-day)
۱۴	v__SMTMP.bsn	دمای ذوب توده برف (^0C)



شکل ۵- شبیه‌سازی دبی در مرحله واسنجی (۲۰۰۳-۱۹۹۷)



شکل ۶- شبیه‌سازی دبی در مرحله اعتبارسنجی (۲۰۰۷-۲۰۰۳)

جدول ۳- حدود اولیه و نهایی پارامترها

پارامتر	حدود اولیه	حدود نهایی
v__ALPHA_BF.gw	-۰/۰۸ -۰/۱۶	۰/۰۳۹
r__ESCO.hru	۰/۲۵ – ۰/۵۸	۰/۴۵
v__OV_N.hru	-۴/۳۸ – ۶/۱۴	-۱/۴۶
r__SOL_BD(1).sol	۱/۲۴-۲/۱۴	۱/۳۳
v__SMFMN.bsn	-۰/۸۸ -۲/۳۱	۰/۶۳
v__GWQMN.gw	-۱۰۳۲/۰۱ - ۹۷۰/۵۹	۴۴۱/۲۴
v__CH_K2.rte	-۳۹۶/۸۱ ۱۷۰/۳۹	۳۳۳/۶۴
v__TIMP.bsn	- ۰/۱۴ – ۰/۱۵	-۰/۱۲
v__CH_N2.rte	۰/۱۱ – ۰/۲۵	۰/۱۸
v__SURLAG.bsn	۲/۴۲-۱۱/۷۴	۸/۴۱
r__SOL_AWC(1).sol	- ۰/۰۱ -۰/۴۷	۰/۰۴۱
v__SFTMP.bsn	۰/۷۹ -۲/۷۵	۱/۸
v__SMFMX.bsn	۱/۶۸ – ۴/۲۸	۳/۰۱
v__SMTMP.bsn	۶/۶۸-۲/۳۵	۶/۰۳

جدول ۴- نتایج آنالیز حساسیت پارامترها (تا دو رقم اعشار)

ردیف	پارامتر	P-value	t-stat
۱	v__ALPHA_BF.gw	۰/۰۰	۱۸/۰۴
۲	v__SURLAG.bsn	۰/۰۱	۲/۳۳
۳	r__SOL_BD(1).sol	۰/۱۳	-۱/۴۹
۴	v__GWQMN.gw	۰/۱۵	۱/۴۳
۵	v__CH_K2.rte	۰/۲۵	۱/۱۴
۶	v__SMFMX.bsn	۰/۲۸	۱/۰۶
۷	v__CH_N2.rte	۰/۲۹	۱/۰۴
۸	v__TIMP.bsn	۰/۳	-۱/۰۱
۹	v__SMFMN.bsn	۰/۳۶	۰/۹
۱۰	v__SFTMP.bsn	۰/۴۱	۰/۸۱
۱۱	r__SOL_AWC(1).sol	۰/۴۵	-۰/۷۴
۱۲	v__SMTMP.bsn	۰/۷۰	۰/۳۷
۱۳	r__ESCO.hru	۰/۹۵	-۰/۰۵
۱۴	v__OV_N.hru	۰/۹۸	-۰/۰۱

با توجه به پژوهش حاضر نتایج زیر حاصل شد.

۱- شبیه‌سازی مؤلفه‌های رواناب سطحی نشان‌دهنده سهم کم جریان آب زیرزمینی در جریان آبراهه اصلی می‌باشد (شکل ۴).

۲- در مرحله واسنجی به‌منظور تعیین حساسیت پارامترها و اثرشان روی رواناب، مدل نسبت به پارامترهای ضریب آب برگشتی، ضریب تاخیر رواناب، حداقل مقدار ذخیره آب در سفره که برای رخ دادن جریان آب پایه لازم است، مقدار ذوب برف در ۲۱ دسامبر (۳۰ آذر) بیشترین حساسیت را نشان داد. این پارامترها با توجه به خصوصیات منطقه و داده‌های ورودی روی مقدار رواناب حوضه موثرترند. حداقل آب مصرفی در تهران از طریق آب‌های زیرزمینی ۳۰ درصد و حتی در مواقع خشک‌سالی به ۵۰ درصد می‌رسد. همچنین، ساختمان‌سازی در منطقه شمیرانات و ازگل و دیگر ارتفاعات باعث شده بسیاری از باغات و قنات‌ها از بین بروند. لذا با توجه به موارد مذکور، حساسیت مدل به این پارامترها می‌تواند قابل توجیه باشد.

جدول ۵- نتایج معیارهای ارزیابی عملکرد مدل در دوره واسنجی (۲۰۰۳- ۱۹۹۷) و اعتبارسنجی (۲۰۰۷-۲۰۰۴)

معیار ارزیابی	مرحله	
	واسنجی	اعتبار سنجی
	۲۰۰۳- ۱۹۹۷	۲۰۰۷-۲۰۰۴
P-factor	۰/۹۶	۰/۹۰
R-factor	۱/۷۹	۱/۵۴
R2	۰/۹۱	۰/۹۲
NS	۰/۸۸	۰/۹۲
RMSE	۲/۴۲	۲/۴۸

۳- در نتیجه تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر در جریان، حساس‌ترین پارامترها به‌ترتیب ضریب جریان آب زیرزمینی و ضریب تأخیر رواناب بودند و پارامترهای مربوط به برف در درجه‌های بعدی قرار گرفتند که با توجه به تغییرات کاربری در دوره آماری مورد مطالعه (۲۰۰۷- ۱۹۹۷) و استفاده بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و کوهستانی بودن منطقه می‌تواند قابل توجیه باشد.

۴- در پیش‌بینی‌های مدل‌های حوضه عدم قطعیت-های زیادی وجود دارد که سه دسته‌اند، عدم قطعیت؛ در مدل مفهومی (یا عدم قطعیت ساختاری)، در ورودی و در پارامترها به‌خصوص غیریگانگی آن‌ها. در SUFI2، تاثیر ترکیبی تمام عدم قطعیت‌ها به‌وسیله تخمین نهایی عدم قطعیت‌های پارامتر نشان داده می-شود. در اولین تکرار، حدود ۸۰ درصد از داده‌های مشاهداتی ماهانه در ایستگاه رودک در ۹۵ ppu قرار داشتند، اما مقدار R-factor بزرگ بود (۱/۶۳) که در نتیجه عدم قطعیت‌های بزرگ مدل بود. در تکرارهای

بعدی برای دوره واسنجی مقدار R-factor افزایش یافت، اما درصد داده‌های مشاهداتی که در ۹۵ pppuقرار دارند به ۹۶ درصد رسید، به‌عبارت دیگر تقریبا همه داده‌های اندازه‌گیری شده در محدوده ۹۵ ppu قرارگرفتند. بنابراین به‌وجود آمدن تعادلی بین این دو فاکتور منجر به نتیجه نهایی واسنجی می‌شود.

همچنین، ضخامت باند ۹۵ ppu بزرگ (R-factor) نشان‌دهنده این است که عدم قطعیت در مدل مفهومی نیز خیلی اهمیت دارد. جدول ۶ مقایسه نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل را در داخل کشور با پژوهش حاضر نشان می‌دهد.

جدول ۶ – مقایسه نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT در پژوهش‌های مشابه داخل کشور با پژوهش حاضر

ایستگاه	دوره اعتبار سنجی (سال)	دوره واسنجی (سال)	واسنجی				اعتبارسنجی			
			P-factor	R-factor	NS	R^2	P-factor	R-factor	NS	R^2
قلعه شاهرخ*	۶	۱۳	۰/۶۴	۰/۸۱	–	–	۰/۷۱	۰/۹۹	–	–
پل چوم			۰/۵۲	۳/۳۵	–	–	۰/۴۲	۳/۶۷	–	–
کوشک آباد	۹	۸	۰/۲	۰/۶	–	۰/۸	۰/۳	۰/۵	–	۰/۷
سولان			۰/۴	۰/۳	–	۰/۷	۰/۴	۰/۴	–	۰/۸
ماهیدشت	۳	۶	–	–	۰/۸۸	۰/۸۹	–	–	۰/۸۶	۰/۹
سنجابی			–	–	۰/۸	۰/۸۱	–	–	۰/۸۴	۰/۸۷
تالار	۱	۲	–	–	-۰/۱۲ ۰/۵۹	۰/۹۲ ۰/۸۴	–	–	-۱/۸۳	۰/۸۹
طالقان	۳	۵	–	–	۰/۵۸	۰/۷۹	–	–	۰/۸۴	۰/۷۵
کسیلیان	۳	۳	۰/۵۵	۰/۴۵	–	۰/۶۸	۰/۵۳	۰/۴۹	–	۰/۷۱
بالادست سدلتیان	۷	۴	۰/۹۶	۱/۷۹	۰/۸۸	۰/۹۱	۰/۹	۱/۵۴	۰/۹۲	۰/۹۲

*قلعه شاهرخ و پل چوم: حوضه زاینده رود، کوشک آباد و سولان: حوزه آبخیز همدان- بهار، ماهیدشت و سنجابی: حوضه قره‌سو از زیر حوضه‌های کرخه و تالار: استان مازندران.

منابع مورد استفاده

1. Abbaspour, K.C. 2009. User manual for SWAT-CUP2, SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Swis Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland, 95 Pages.
2. Abbaspour, K.C., J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner, J. Zobrist and R. Srinivasan. 2007. Modeling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. Journal of Hydrology, 333: 413–430.
3. Akhavan, S., F. Mousavi, J. Abedi, K. Abbaspour and B. Yaghobi. 2010. Application of SWAT model to estimating of water resources in Hamadan–Bahar Watershed, Iran. 1th national conference of water resources usage researches, Iran. 10 pages (in Persian).
4. Maghrebi. M. and M. Tajrishi. 2010. The modeling of journey and movement of fecal coliforms bacterium in Jajroud river watershed management. 8th international congress of civil engineering, Shiraz University (in Persian).
5. Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry and J.R. Williams. 2005. Soil and water assessment tool theoretical documentation, Version 2005.
6. Omani, N., M. Tajrishi, A. Abrishamchi. 2006.Simulating of Runoff by SWAT&GIS.7th international seminar of river engineering .Ahwaz. 8 pages (in Persian).

7. Salajaghe, A. and A. Aghamaleki. 2010 . Simulation modeling for watershed management. University of Tehran Press, 200 pages (in Persian).

Simulation of discharge, calibration and validation of SWAT model, case study: Tehran Latyan dam upstream

Hiwa Osmani[*1], Baharak Motamedvaziri[2] and Abolfazl Moeni[3]
[1] MSc Student, Sciences and researches Unit, Islamic Azad University, Iran, [2,3] Assistant Professor, Sciences and researches Unit, Islamic Azad University, Iran

Received: 10 February 2013 Accepted: 03 July 2013

Abstract

The purpose of this study is to test the efficiency of the Soil and Water Assessment Test (SWAT) and its applicability as a flow simulator, and using SWAT-Cup software and the SUFI2 algorithm as a means to calibrate and validate Tehran's Latyan Dam upstream area. In order to test the efficiency of this model in simulating output discharge, by comparing Roodak hydrometric station simulation values situated at the exit of the area during an 11-year period (1997-2007), it was specified that the model did not perform well in simulating Bik discharges. Further on, at first, 21 effective flow parameters were entered into the SWAT-Cup software, which after analyzing sensitivity, 14 parameters were used for calibration and validation. Calibration was carried out for years 1997 to 2003, and validation was conducted for years 2007 to 2007. Different assessment indexes were employed to measure performance of the model in SWAT-Cup software and the SUFI2 algorithm, which indexes R2, NS, P-Factor, and R-Factor for the calibration period were 0.91, 0.88, 0.96, 1.79, and values for the validation period 0.92, 0.92, 0.9, and 1.54, respectively. Moreover, the Alpha coefficient for underground water, surface water delay coefficient, and soil outward density were recognized as the most sensitive parameters in output discharge.

Key words: Roodak hydrometric Station, SUFI2 Algorithm, SWAT-Cup Software, Validation

[*] Corresponding Author: hiwa_osmani@yahoo.com