

واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب، مطالعه موردی: حوزه آبخیز نکا

پیام ابراهیمی^{۱*}، جمیله سلیمی کوچی^۲ و محسن محسنی ساروی^۳

^۱ دانش آموخته دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ^۲ دانش آموخته دکتری، گروه مدیریت جامع حوزه آبخیز، سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری و ^۳ استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۰۲

چکیده

مدل SWAT یک مدل هیدرولوژیک پیوسته و فیزیک پایه است که فرایندهایی نظیر تولید رواناب، بار رسوب و نیتروژن برای هر یک از واحدهای هیدرولوژیک شبیه‌سازی می‌شود. هدف اصلی در این پژوهش، آزمون کارایی مدل ارزیابی SWAT و قابلیت استفاده از آن به‌عنوان شبیه‌ساز جریان و استفاده از نرم‌افزارهای SWAT-CUP و الگوریتم‌های SUFI2 برای واسنجی و اعتبارسنجی حوزه آبخیز نکا مازندران می‌باشد. در این پژوهش، از شاخص‌های عامل P، عامل R، NS و R² به‌منظور ارزیابی مدل SWAT استفاده شد. از آمار رواناب چهار ایستگاه هیدرومتری در سال‌های ۱۳۷۳-۱۳۸۲ به‌منظور واسنجی و ۱۳۸۳-۱۳۸۷ برای اعتبارسنجی این حوضه به‌کار برده شده است. ضرایب واسنجی برای آبلو، پایین‌زندین، کارخانه سیمان و سفیدچاه به‌ترتیب ۰/۸۵، ۰/۷۸، ۰/۷۸، ۰/۸۹، برای P-factor ۰/۵۵، ۰/۳، ۰/۷۱، ۱/۷۱ برای عامل R؛ ۰/۶۲، ۰/۶۹، ۰/۷۱ برای NS و ۰/۷۶، ۰/۸۲، ۰/۷۶، ۰/۶۳ برای R² به‌دست آمد. اعتبارسنجی این حوضه نیز برای آبلو، پایین‌زندین، کارخانه سیمان و سفیدچاه به‌ترتیب ۰/۸۸، ۰/۸۷، ۰/۷۲، ۰/۷۲ برای P-factor؛ ۰/۶۱، ۰/۲۴، ۰/۵۶، ۱/۷۸ برای R-factor؛ ۰/۷۴، ۰/۶۶، ۰/۵۸، ۰/۶۴ برای NS و ۰/۸۱، ۰/۶۸، ۰/۷۳، ۰/۶۱ برای R² به‌دست آمد. نتایج کلی واسنجی مدل نشان می‌دهد که مدل SWAT می‌تواند ابزار مناسبی در رابطه با شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز نکا باشد.

واژه‌های کلیدی: حوزه‌های آبخیز دریای خزر، خاک، دبی اوج، شماره منحنی، واحدهای هیدرولوژیک

مقدمه

کاراست. واکنش هیدرولوژی یک حوزه آبخیز، نماد جامعی از شرایط و خصوصیات محیط طبیعی آن حوضه می‌باشد. در یک بوم‌سازگان طبیعی بهره‌برداری از زمین و ایجاد تغییر در شرایط محیطی به‌ویژه پوشش گیاهی و کاربری اراضی آن بوم‌سازگان، بر پاسخ‌های هیدرولوژی مانند جاری شدن سیلاب و میزان فرسایش و رسوب منطقه تأثیرگذار می‌باشد. پیدایش و تکامل پیوسته انتشار گازهای گلخانه‌ای

امروزه سامانه اطلاعات جغرافیایی، ابزار معمول مورد استفاده در مدیریت منابع طبیعی به‌ویژه آبخیزها می‌باشد که با مجموعه‌های متعددی از بانک‌های اطلاعاتی مانند نقشه‌های رقوم ارتباط دارد. از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی می‌توان برای پیش‌بینی نتایج فعالیت‌های مدیریتی استفاده نمود. این ابزار برای تحت کنترل درآوردن شرایط سامانه بسیار

مدیریتی است. با استفاده از مدل مطالعات مختلفی بر روی دبی رودخانه انجام شده است که نتایج نشان می‌دهد این مدل می‌تواند به خوبی دبی رودخانه را پیش‌بینی کرده، در مقایسه با روش‌های مدل‌سازی منابع نقطه‌ای، نتایج بهتری را به دست می‌آورد (Sun و Cornish، ۲۰۰۵). علاوه بر این، مدل می‌تواند رواناب متوسط سالانه را با دقت بالایی برآورد کند (Bingner، ۱۹۹۶).

بررسی و پیش‌بینی مدل در زمینه رسوب نشان داده است، مدل توانایی‌های مختلفی را در زمینه مدیریت حوزه آبخیز نشان داده است (Yesuf و همکاران، ۲۰۱۵). مشکلات و تغییراتی که در مرحله حمل رسوب به وسیله رودخانه صورت می‌گیرد را می‌توان با استفاده از مدل شبیه‌سازی و بررسی کرد و سپس نواحی که باعث این تغییرات می‌شود را نشان داد (Niazi و همکاران، ۲۰۱۵). این مدل در زمینه شبیه‌سازی، رسوب روزانه را با ضریب $R^2=0/74$ به دست آورده است (Gholami، ۲۰۰۰). در زمینه مطالعات فرسایش و رسوب (Van Liew و همکاران، ۲۰۰۳) توانایی مدل در تخمین شدت جریان تحت شرایط آب و هوایی مختلف در سه زیرحوضه از ایالت اوکلاهامای آمریکا را بررسی کردند و دریافتند که این مدل می‌تواند به خوبی مقدار رواناب روزانه در هر زیرحوضه را تحت شرایط خشک، معتدل و شرایط مرطوب پیش‌بینی کند. همچنین، تحقیقات Abbaspour و همکاران (۲۰۰۷) از مدل مذکور برای شبیه‌سازی تمام فرایندهای مؤثر بر کیفیت آب، رسوب و چرخه غذایی حوضه رودخانه تور در شمال شرقی کشور سوئیس با مساحتی در حدود ۱۷۰۰ کیلومتر مربع نشان داد که این مطالعه نتایج بسیار خوبی برای شبیه‌سازی رواناب و نیترات و نتایج نسبتاً خوبی برای شبیه‌سازی دو هفته‌ای رسوب و فسفر داشت. در این مطالعه واسنجی مدل و تحلیل عدم قطعیت به وسیله روش SUFI2 انجام شد و با استفاده از محاسبه دو پارامتر، دقت واسنجی ارزیابی شد. در پارامتر اول درصد داده‌هایی که در نوارهای عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار دارند، یعنی 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

پدیده تغییر اقلیم را تشدید نموده است از این رو، ابزاری که بتواند این اثرات را کمی‌سازی نماید بسیار مورد توجه بوده، شناختن مدیریت منابع آب نقش قاطعی در حمایت از اقتصاد منطقه خواهد داشت. مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی در تفسیر و پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم و تغییر کاربری بر جریان بسیار اهمیت دارند. این مدل‌ها به تغییرات زمین، آب و هوا حساس هستند.

برای آگاهی از شرایط سامانه، بایستی که عوامل پویایی سامانه به آن اضافه شود. مدل SWAT^۱ 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 (Aghamaleki و Salajeghe، ۲۰۱۱). مدل ریاضی SWAT یکی از مدل‌های شبیه‌سازی چندمنظوره برای مدیریت حوزه‌های آبخیز است.

توانایی مدل در شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیک و کیفیت آب در یک حوضه کشاورزی در ناحیه‌ای از مریلند به وسیله Shepherd و همکاران (۱۹۹۹)، مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها بزرگ مقیاس بودن، توزیعی بودن و هم‌آهنگ بودن مدل با سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) را از مزیت‌های این مدل معرفی کردند.

اگرچه این مدل به عنوان یک ابزار مناسب برای ارزیابی اثرات درازمدت روش‌های مدیریتی متفاوت برای کاهش بار فسفر در مخازن استفاده شده است (Shoemaker و Tolson، ۲۰۰۴)، اما با توجه به تحقیقات Chu و همکاران (۲۰۰۲) به کار بردن مدل مذکور برای یک حوضه ۳۴۰ هکتاری در ناحیه کوهپایه‌ای مریلند و استفاده از آمار شش‌ساله هیدرولوژیک و غلظت کودهای موجود در آب و واسنجی مدل نشان داد که مدل به کار گرفته شده قادر به شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیک بسیار مرطوب نیست. اما در مجموع با توجه به تحقیقات Panhalkar (۲۰۱۴) مدل مورد بحث در این پژوهش یک مدل حوضه‌ای مناسب برای شبیه‌سازی دراز مدت اهداف

¹ Soil and Water Assessment Tool

حوزه آبخیز نکا قابل قبول ارزیابی می‌شود. بدین منظور از طریق بررسی ضرایب مختلف دقت‌سنجی به این ارزیابی پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

حوزه آبخیز نکا از حوزه‌های آبخیز دریای خزر می‌باشد و در محدود جغرافیایی ۱۷° ۵۳' الی ۴۴° ۵۴' طول شرقی و ۲۸° ۳۶' الی ۴۲° ۳۶' عرض شمالی واقع است. این حوضه از شمال به حوزه آبخیز قره‌سو و حوضه‌های کوچک خلیج گرگان، از غرب به حوزه آبخیز تجن، از شرق به حوزه آبخیز قره‌سو گرگان و از جنوب به حوزه آبخیز تجن و حوزه‌های آبخیز استان سمنان منتهی می‌شود. مساحت این حوضه معادل ۱۹۲۲ کیلومتر مربع و محیط آن ۴۰۶ کیلومتر است. ارتفاع بلندترین نقطه حوضه ۳۵۰۰ متر (ارتفاعات شاه‌کوه) و ارتفاع پست‌ترین نقطه حوضه در منطقه خروجی (ایستگاه آبلو) حدود ۵۰ متر و در محل اتصال به دریای خزر ۲۰- متر می‌باشد. حدود ۶۱ درصد حوضه در محدوده استان مازندران و ۳۹ درصد آن در محدوده استان گلستان واقع شده است (Ebrahimi و همکاران، ۲۰۱۳). شکل ۱، محدوده مورد مطالعه و ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی حوزه آبخیز نکا را نشان می‌دهد.

در این بخش، نقشه کاربری اراضی نکارود با استفاده از تصویر ۱۳۷۳ ETM و ۱۳۸۷ IRS در دو بازه زمانی مشخص شد. میزان تغییرات از طریق تفاضل مساحت این دو سال مشخص شد و نقشه نهایی به- صورت یک لایه به مدل SWAT ارایه شد. در روش نظارت شده، طبقه‌بندی تصویر از طریق مقایسه مقادیر و مشخصات طیفی هر پیکسل با مشخصات از پیش تعیین شده انجام می‌شود. بر همین اساس، به اطلاعاتی تحت عنوان مناطق نمونه یا تعلیمی نیاز است که باید از طریق دانش قبلی نسبت به منطقه مورد بررسی یا از طریق مشاهدات زمینی یا تصاویر دیگر تأمین شود. در این نوع طبقه‌بندی، تصاویر رقومی طبقات مورد نظر نباید با یکدیگر هم‌پوشانی طیفی داشته باشند. زیرا، در این صورت جداسازی

شبیه‌سازی شده و در پارامتر دوم 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 به‌راحتی می‌توان از این مدل به‌عنوان یک مدل پیش-رو در مطالعات مدیریت حوضه استفاده کرد.

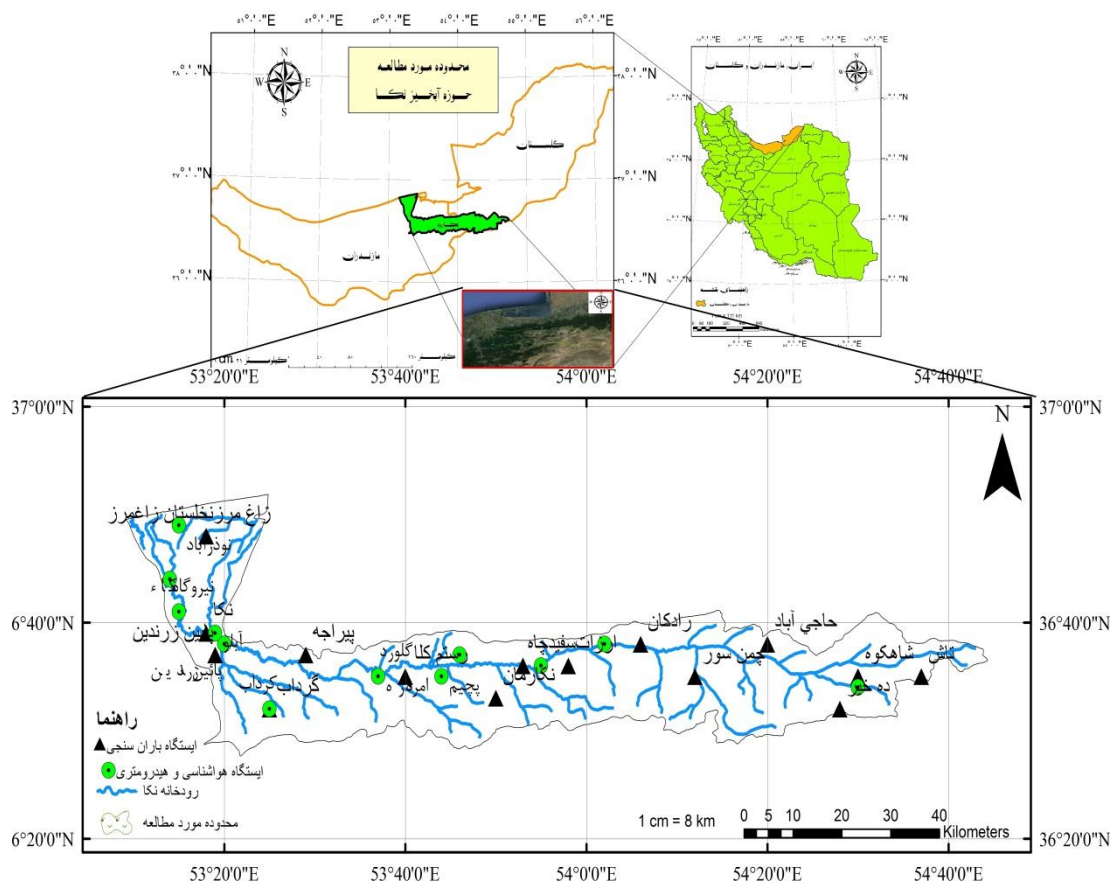
این مدل با استفاده از برنامه‌هایی نظیر FORTRAN و Intel C به‌وسیله Sue و همکاران (۲۰۱۵) شبیه‌سازی و کدنویسی شده است و مشاهده شد، واسنجی دبی خروجی از مدل در زیرحوضه‌های بزرگ بسیار دقیق‌تر پیش‌بینی می‌شود.

Hosseini و همکاران (۲۰۱۳) معتقدند ارزیابی مؤلفه‌های جریان با استفاده از این مدل قابل بررسی می‌باشد. امکان استفاده از مدل بیان شده برای ارزیابی برنامه‌های زیست محیطی و حفاظتی در تحقیقات Baffaut و همکاران (۲۰۰۵) وقتی که داده‌های واسنجی شده در دسترس نباشد، بسیار مناسب خواهد بود. ارزیابی مؤلفه‌های جریان با استفاده از این مدل و فرسایش و رسوب و نیز مقایسه آن با دیگر مدل‌ها نظیر WetSpa از جمله مزایایی است که می‌توان برشمرد (Hosseini و همکاران، ۲۰۱۳؛ Akbari Mejdari و همکاران، ۲۰۱۳). از این‌رو، مدیریت با استفاده از مدل مذکور یکی از پرکاربردترین روش‌های مدیریتی می‌باشد (Arefi asl و همکاران، ۲۰۱۳).

هدف از این پژوهش، شبیه‌سازی رواناب حوزه آبخیز نکا و مدیریت بر اساس مدل SWAT می‌باشد تا بتوان دبی سیلابی را با توجه به داده‌های موجود پیش-بینی نمود. از این طریق می‌توان دبی شبیه‌سازی شده و دقت مدل مورد نظر را در حوزه آبخیز مورد مطالعه مورد بررسی قرار داد. در بیشتر حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه نبود اطلاعات کافی و یا نواقص آماری بررسی واکنش حوضه را نسبت به بارش و رواناب ایجاد شده تحت تأثیر قرار داده است. حوزه آبخیز مذکور هر ساله دچار سیلاب می‌شود و بررسی مدل معرفی شده و پیش‌بینی‌های آن نقش به‌سزایی در مدیریت حوزه آبخیز نکا خواهد داشت. استفاده از مدل پیشنهادی با توجه به مطالعات سایر حوضه‌ها در پاسخ هیدرولوژی

اصلاحات لازم صورت پذیرد. به این ترتیب که تعداد طبقات مورد نظر برای نرم افزار تعریف شده و سپس نرم افزار با توجه به خصوصیات طیفی پدیده‌ها آن‌ها را در طبقات مشخص و تعریف شده‌ای قرار می‌دهد.

عوارض به‌طور قابل اعتماد ممکن نخواهد بود. با استفاده از نرم افزارهای پردازش رقومی تصاویر ماهواره‌ای می‌بایست پراکندگی نمونه‌ها و به‌ویژه میانگین و واریانس آن‌ها در فضای دوبعدی بررسی و



شکل ۱- حوزه آبخیز نکا و ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی

$$F_{inf t} = k_e \times \left(1 + \frac{\Psi_{af} + \Delta\theta_v}{F} \right) \quad (1)$$

که در آن، $F_{inf t}$ مقدار نفوذپذیری در واحد زمان (میلی متر بر ساعت)، K_e هدایت هیدرولیکی مؤثر (میلی متر بر ساعت)، Ψ_{af} پتانسیل ماتریک جبهه رطوبتی (میلی متر)، $\Delta\theta_v$ تغییرات رطوبت حجمی (میلی متر) و F نفوذپذیری تجمعی در زمان (میلی متر) می‌باشد (راهنمای مدل SWAT، ۲۰۰۸).

منحنی SCS: در این روش شماره منحنی خاک و مقدار نفوذ آب نقش اساسی دارند. این روش یک مدل تجربی است که در سال ۱۹۵۰ به‌وسیله سازمان حفاظت آب و خاک آمریکا مورد استفاده قرار گرفت. این معادله به‌صورت ذیل تعریف می‌شود.

به‌منظور شبیه‌سازی رواناب حوزه آبخیز نکارود از مدل SWAT استفاده شد. مدل SWAT یک مدل سری زمانی است که برای مدل‌سازی حوضه‌های بزرگ و پیچیده کاربرد دارد (Abbaspour، ۲۰۰۹). شبیه‌سازی رواناب سطحی در مدل SWAT با دو روش زیر می‌تواند صورت گیرد.

گرین آمپت: در این روش با استفاده از محاسبات رواناب، داده‌های بارش و هدایت هیدرولیکی مقدار رواناب محاسبه می‌شود. 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 (۱) تعریف می‌شود.

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- بیشتر داده‌های مشاهده‌ای در سطح PPU ۹۵ واقع شوند ($p \rightarrow \text{factor}$) و 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 ($r \rightarrow \text{factor}$) (Jeirani و همکاران، ۲۰۱۱).

در سال‌های اخیر، مدل‌سازی معکوس (IM) روشی معمول برای واسنجی مدل‌ها شده است. از آنجایی که انتخاب مقادیر مختلف برای پارامترسازی و واسنجی مدل محدود بوده و روشی پرهزینه است، مدل‌سازی معکوس جایگزین مناسب برای واسنجی مدل و انتخاب مقادیر مناسب برای پارامترها می‌باشد. روش SUFI یک مدل معکوس است که برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت استفاده می‌شود (Akhavan و همکاران، ۲۰۱۰). این مدل معکوس مدل SWAT عمل می‌کند و با در نظر گرفتن داده‌های مشاهده‌ای، محدوده مجاز پارامترهای مدل SWAT که در واسنجی مدل نسبت به حوضه مطالعاتی نقش دارند، مانند شماره منحنی خاک و بسیاری پارامترهای دیگر، میزان بهینه پارامترهای مذکور را برآورد می‌کند (Abbaspour, ۲۰۰۹). برای ارزیابی کارایی مدل و برای به‌دست آوردن بهترین واسنجی و محدود کردن جواب‌ها به سمت جواب یگانه، گاهی لازم است چندین روش آماری مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش ارزیابی مدل به کمک ضریب NS (ناش-ساتکلیف) و ضریب همبستگی (تبیین) (R^2) انجام می‌گیرد (Sohrabi و Ababaei, ۲۰۰۹).

ضریب همبستگی (R^2): 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. ضریب R^2 بین

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0/2S)^2}{(R_{day} - 0/8S)^2} \quad (2)$$

که در آن، Q_{surf} ارتفاع رواناب (میلی‌متر)، R_{day} ارتفاع باران (میلی‌متر) و S 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 (۳) به‌دست می‌آید.

$$S = 25/4 \left[\left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \right] \quad (3)$$

که در آن، CN شماره منحنی است که از جداول تهیه شده به‌منظور تعیین میزان CN به‌دست می‌آید. چرخه هیدرولوژی از طریق SWAT بر اساس رابطه موازنه آبی شبیه‌سازی شده است.

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t \begin{pmatrix} R_{day} - Q_{surf} - Ea \\ -w_{seep} - Q_{gw} \end{pmatrix} \quad (4)$$

که در آن، SW_t حجم نهایی آب در خاک (میلی-متر آب)، SW_o حجم اولیه آب در خاک در روز (میلی-متر آب)، R_{day} مقدار بارندگی روزانه (میلی‌متر آب)، Q_{surf} میزان رواناب سطحی روزانه (میلی‌متر آب)، Ea میزان تبخیر و تعرق روزانه (میلی‌متر)، w_{seep} میزان آب ورودی از نواحی اطراف به پروفیل خاک (میلی‌متر آب) و Q_{gw} مقدار تراوش بازگشتی روزانه آب (میلی‌متر آب) می‌باشد. مدل SWAT یک مدل پیوسته است یعنی خروجی یک معادله، ورودی معادله دیگر است. با توجه به ورودی‌های داده شده به مدل (مشخات خاک، کاربری، مدل رقومی ارتفاع و اطلاعات هواشناسی) مقدار پارامترهای تبخیر روزانه، آب ورودی از نواحی اطراف پروفیل، مقدار تراوش بازگشتی روزانه، مقدار رطوبت خاک و غیره محاسبه می‌شود و در نهایت مقدار رواناب خروجی از حوزه آبخیز مشخص می‌شود (Neitsch و همکاران، ۲۰۰۵).

به‌منظور بهبود کیفیت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت در نتایج مدل از روش SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CAP استفاده شد. برنامه SUFI2 واسنجی و عدم قطعیت را ترکیب کرده و سعی می‌کند پارامترهای عدم قطعیت را به‌نحوی تعیین کند که بیشتر داده‌های مشاهده‌ای در ناحیه عدم قطعیت

ENVI و نقاط دارای مختصات GPS کاربری‌های اراضی به صورت نمونه از شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران تهیه شد و تفاضل مساحت هر یک از واحدهای کاربری اراضی در محیط GIS مشخص شد و به صورت یک لایه کاربری اراضی به مدل ارایه شد. با توجه به پژوهش‌های سایر محققین، تغییر کاربری اراضی حوزه آبخیز نکا در دهه اخیر تغییرات قابل توجهی داشته است و روند این تغییرات قبل از این دهه نامحسوس بوده است. بر همین اساس، کاربری اراضی دهه اخیر به عنوان ورودی مدل انتخاب شد. از داده‌های عددی شامل آمار روزانه ۱۴ ساله بارندگی (۱۳۷۳-۱۳۸۷)، درجه حرارت کمینه، درجه حرارت بیشینه و رطوبت نسبی ۱۱ ایستگاه هواشناسی موجود در منطقه و چهار ایستگاه هیدرومتری استفاده شد. در شکل ۱، مختصات ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی مورد استفاده آورده شده است. با توجه به این که با دسته‌بندی دوره‌های خشک و تر سال‌های مذکور می‌توان دقت مدل را افزایش داد به دلیل کوتاه بودن بازه زمانی این تقسیم‌بندی صورت نگرفت.

نقشه‌های مکانی شامل لایه کاربری اراضی (شکل ۲- الف) لایه‌های مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک ۲۰ متر (شکل ۲- ب)، خاک منطقه (شکل ۳) می‌باشد. لایه کاربری اراضی شامل پنج طبقه کاربری است. از مطالعات انجام شده در سایر مناطق به منظور تعیین پارامترهای ورودی به برنامه SWAT-CUP استفاده شد. زیرا در پیش فرض برنامه SWAT-CUP تنها چهار پارامتر ذکر شده است و بقیه پارامترها باید به صورت دستی به برنامه اضافه شود. مقادیر اولیه این پارامترها از راهنمای برنامه استخراج شد. بعد از ورود این پارامترها به برنامه از طریق الگوریتم SUFI2 پارامترهای حساس با استفاده از ۱۰ سال آمار دبی ماهانه رودخانه (۱۳۷۳ تا ۱۳۸۷) تعیین شد و محدوده مقادیر با چند صد بار اجرا انتخاب شد، سپس بعد از چند هزار بار اجرای مدل (نزدیک به ۴۸ ساعت) مقادیر بهینه پارامترهای حساس ورودی تعیین شد.

صفر تا یک متغیر است، چنانچه مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برابر باشند، مقدار آن برابر با یک است.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \times (P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (5)$$

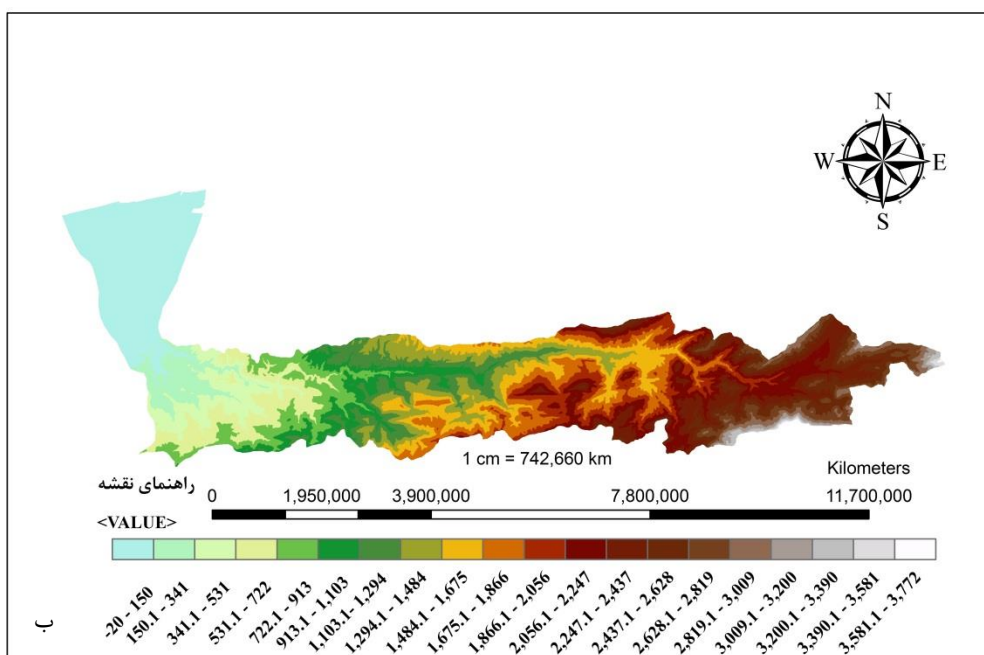
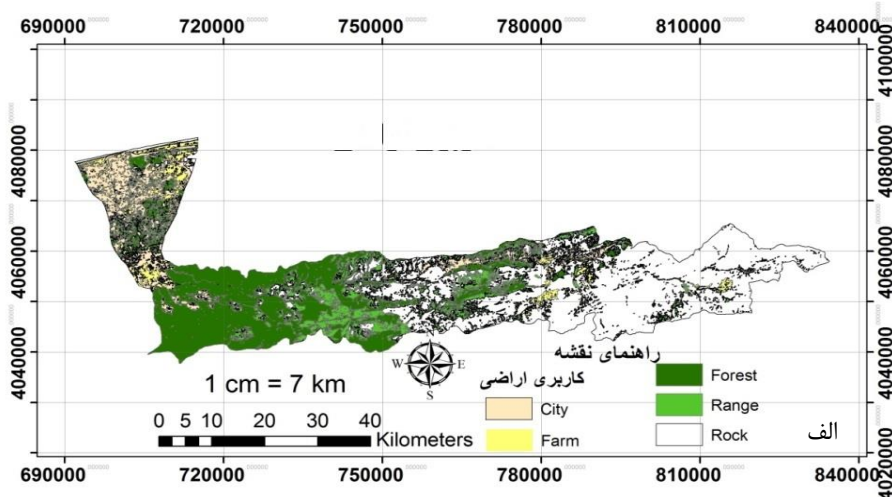
که در آن، n تعداد مشاهدات، O و P_i مقادیر متناظر مشاهده و پیش‌بینی شده، \bar{O} و \bar{P} نیز میانگین ریاضی مقادیر مشاهده و پیش‌بینی شده است. ضریب همبستگی نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر پیش‌بینی و مشاهده شده تا چه میزان به بیشینه مقدار هماهنگی بین این دو سری مقدار نزدیک است و از صفر تا یک تغییر می‌کند (Santhi و همکاران، ۲۰۰۱).

ضریب (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 به طریق زیر محاسبه می‌شود.

$$NS = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (6)$$

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 صورتی که میزان آن بیشتر از ۰/۵ باشد، نشان‌دهنده این است که شبیه‌سازی با استفاده از مدل خوب است (Gassman و همکاران، ۲۰۰۷).

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، شامل دو بخش داده‌های عددی و نقشه‌های مکانی می‌باشد. در بخش نقشه‌های مکانی دو سال ۱۳۷۳ و ۱۳۸۷ در فصل تابستان و با فاصله ۱۰ روز از هم انتخاب شدند. این تصاویر مربوط به ماهواره IRS و ETM می‌باشد. دقت این تصاویر هر دو به دقت ۳۰ متر یکسان‌سازی شد. کاربری اراضی هر دو تصویر به وسیله نرم‌افزار

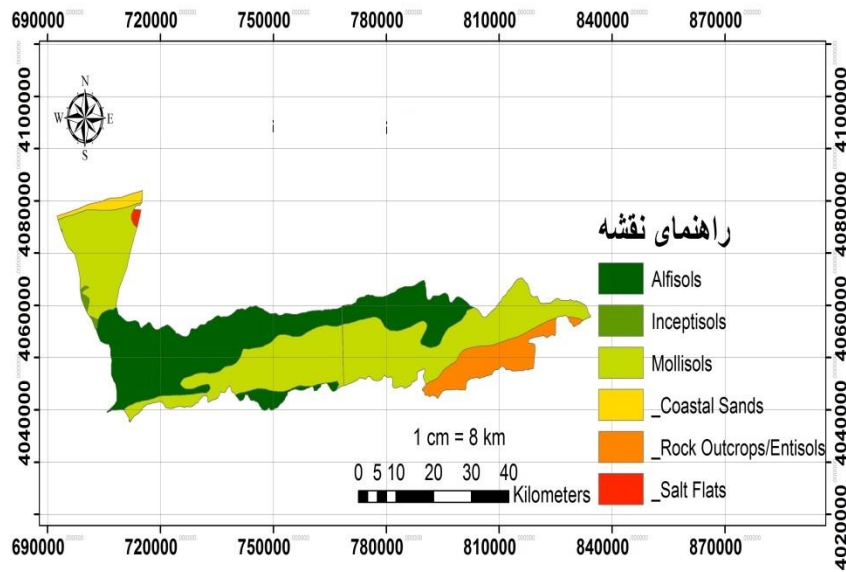


شکل ۲- الف) کاربری اراضی، ب) مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک ۲۰ متر

و همکاران، ۲۰۰۵ انتخاب شد و مقادیر اولیه آن‌ها بر اساس جدول اساس لیست تهیه شده در راهنمای SWAT (version 3.1.3) وارد شد (Neitsch و همکاران، ۲۰۰۵). این جدول اساس در راهنمای مدل SWAT موجود است و محدوده مجاز برای ورودی هر پارامتر را مشخص می‌نماید. پس از یک تکرار ۶۰۰ موردی و با استفاده از الگوریتم SUFI2، هشت پارامتر که حساسیت بیشتری داشتند، انتخاب شدند. جدول ۲ پارامترهای مورد استفاده موثر در دبی جریان را در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد شکل‌های ۵ تا ۸ نتایج شبیه‌سازی دبی در دوره واسنجی ۱۳۷۳ تا ۱۳۸۲

لایه اطلاعات خاک منطقه به شش واحد خاک تقسیم‌بندی و شیب منطقه مورد مطالعه به پنج طبقه تقسیم‌بندی شد. به دلیل وجود تنوع در نقشه کاربری اراضی و خاک و برای اطمینان از تفکیک‌پذیری بالا، واحدهای هیدرولوژیک به صورت چندگانه برای هر زیرحوضه تعریف شدند. با تعیین ۵-۵-۵ درصد آستانه برای لایه کاربری اراضی، خاک و طبقات شیب تنها چهار واحد پاسخ هیدرولوژیک به دست آمد. در ادامه برای واسنجی و اعتبارسنجی، ابتدا ۲۰ پارامتر مؤثر در جریان (جدول ۱) با توجه به منطقه مورد مطالعه و مطالعات انجام شده در این زمینه مانند Robert و همکاران، ۲۰۰۸؛ Etienne و همکاران، ۲۰۰۸؛ Holvet

برای ایستگاه‌های آبلو، پایین زرندين، سفیدچاه و کارخانه سیمان را نشان می‌دهد.



شکل ۳- لایه خاک حوزه آبخیز نکارود

جدول ۱- پارامترهای موثر در جریان

نام پارامتر	توضیحات	حداقل	حداکثر
Sol_K	هدایت هیدرولیکی اشباع لایه‌های خاک (mmhr^{-1})	۲۰۰	۲۰۰۰
Sol_Z	عمق لایه‌های خاک (mm)	۵۰	۲۵
Timp	عامل تأخیر دمای فشرده‌سازی برف	۰/۲	۱
Tlaps	نرخ تغییرات دما با ارتفاع در هر زیرحوضه ($\text{C}^\circ\text{Km}^{-1}$)	۱۰	۵۰
CH-WDR	نسبت عرض به عمق رودخانه	۱۰	۱۰۰۰
LAT-TTIME	زمان تأخیر در هر HRU (day)	۶۰	۱۸۰
IRR-AMT	آب مورد نیاز برای آبیاری ($\text{mm H}_2\text{O day}^{-1}$)	۱۰	۱۰۰
SFTMP	متوسط دمای هوا برای تبدیل باران به برف (C°)	۰/۱۸	۲/۵
ALPHA_BF	ضریب α آب زیرزمینی	۰/۰۲	۱
EPCO	عامل جبران نگهداشت گیاهی	۰/۰۹	۱
ESCO	ضریب تبخیر خاک	۰	۱
GW_REVAP	ضریب نفوذ به آب زیرزمینی عمیق	۰/۲	۱/۵
SURLAG	ضریب تاخیر رواناب سطحی (day)	۱	۲۴
GW_DELAY	زمان تاخیر انتقال آب زیرزمینی (day)	۰	۳۰۰
RCHARG_DP	درصد تغذیه سفره عمیق از سفره کم عمق	۰/۶	۱
CH_N2	ضریب مانینگ رودخانه اصلی	۰	۱
CN2	شماره منحنی SCS اولیه (II)	-۰/۸	۰/۸
SOL_BD	جرم مخصوص ظاهری لایه‌های خاک (gcm^{-3})	۰/۱	۲/۵
SOL_AWC	ظرفیت رطوبت قابل استفاده لایه‌های خاک ($\text{mmH}_2\text{O/mmSoil}$)	-۰/۹	۱
CH_K2	قابلیت هدایت هیدرولیکی موثر (mmhr^{-1})	۴۰	۱۵۰

برای واسنجی انتخاب شده، در مرحله واسنجی بعد از ابتدا ۲۰۰۰ بار اجرای مدل مقادیر بهینه برای این پارامترها مشخص شد که در جدول ۳ آورده شده است. در واقع مقدار این پارامترها پیش فرض مدل یا ورودی مدل نیستند، بلکه جزیی از نتایج اجرای مدل می‌باشند.

برای واسنجی مدل به‌منظور شبیه‌سازی رواناب ابتدا ۲۰ پارامتر با توجه به مشخصات حوضه و مطالعات انجام شده گذشته که احتمال می‌رفت تاثیر بیشتری در شبیه‌سازی رواناب خروجی دارند به مدل داده شد (جدول ۲). بدین ترتیب این هشت پارامتر

جدول ۲- پارامترهای مدل و محدوده تغییرات در مدل SWAT

ردیف	نام پارامتر	توصیف پارامتر	حداقل	حداکثر
۱	v_CH_K2.rte	قابلیت هدایت هیدرولیکی موثر (mmhr^{-1})	۰	۱۵۰
۲	r_SOL_AWC.sol	ظرفیت رطوبت قابل استفاده لایه‌های خاک ($\text{mmH}_2\text{O}/\text{mmSoil}$)	۰/۹	۱
۳	r_SOL_BD.sol	جرم مخصوص ظاهری لایه‌های خاک (gcm^{-3})	۰/۶	۲/۵
۴	r_CN2.mgt	شماره منحنی SCS اولیه برای شرایط رطوبتی متوسط (II)	۰/۰۴۰	۰/۰۸۵
۵	v_CH_N2.rte	ضریب مانینگ رودخانه اصلی	۰	۱
۶	v_RCHARG_DP	درصد تغذیه سفره عمیق از سفره کم عمق یا غیر محصور	۰	۱
۷	V_GW_DELAY.bsn	زمان تأخیر انتقال آب از آخرین لایه خاک به آب زیرزمینی (day)	۰	۵۰۰
۸	V_SURLAG.gw	ضریب تأخیر رواناب سطحی (day)	۱	۲۴

علامت V نشان‌دهنده جایگزین شدن مقدار پارامتر و علامت r نشان‌دهنده ضرب کردن مقدار این پارامتر می‌باشد.

جدول ۳- نتایج تحلیل حساسیت پارامترها همراه با مقادیر بهینه ماهانه

ردیف	نام پارامتر	مقدار بهینه	t-stat	p-value
۱	v_CH_K2.rte	۹۸	۳/۰۲	۰/۲۸
۲	r_SOL_AWC.sol	۰/۶	۴/۸۷	۰/۱۰
۳	r_SOL_BD.sol	۰/۸	۴/۱۷	۰/۱۱
۴	r_CN2.mgt	۰/۱۶۸	۱/۷۲	۰/۴۱
۵	v_CH_N2.rte	۰/۵۲	۱/۰۱	۰/۸
۶	v_RCHARG_DP	۰/۲۴	۲/۳۷	۰/۳۲
۷	V_GW_DELAY.bsn	۲۰۶	۱/۴۳	۰/۶۴
۸	V_SURLAG.gw	۴/۲۴	۱/۳۱	۰/۶۶

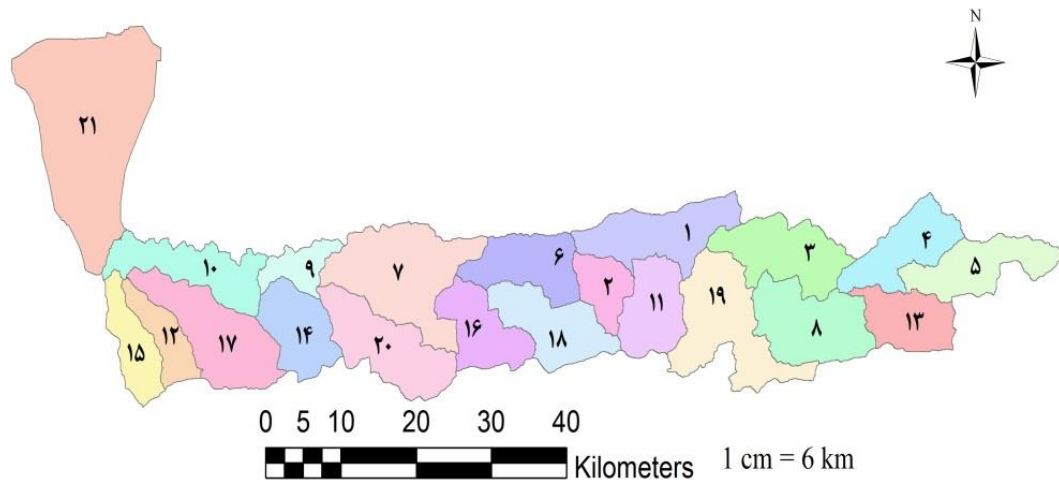
نتایج و بحث

رضایت‌بخش تشخیص داده شود که شاخص آماری R^2 بیشتر از ۰/۶ و نش-ساتکلاف بیشتر از ۰/۵ باشد. از این‌رو، نتایج پژوهش با این مقادیر مطابقت دارد و نشان می‌دهد که الگوریتم SUFI2 مشاهدات را در طی واسنجی به‌خوبی برای حوضه نکا در بر گرفته است (شکل‌های ۵ تا ۸). در مرحله بعد، اعتبارسنجی نتایج مدل به‌منظور افزایش سطح اعتماد کاربر در قابلیت پیش‌بینی مدل صورت گرفت. بنابراین، مدل به‌وسیله داده‌های رواناب مشاهده‌ای در ایستگاه‌های اندازه‌گیری برای دوره پنج ساله (۱۳۸۳ تا ۱۳۸۷) اعتبارسنجی شد. نتایج حاصل در شکل‌های ۹ تا ۱۲ نشان داده شده است. در دوره واسنجی مدل، مقدار بهینه برای

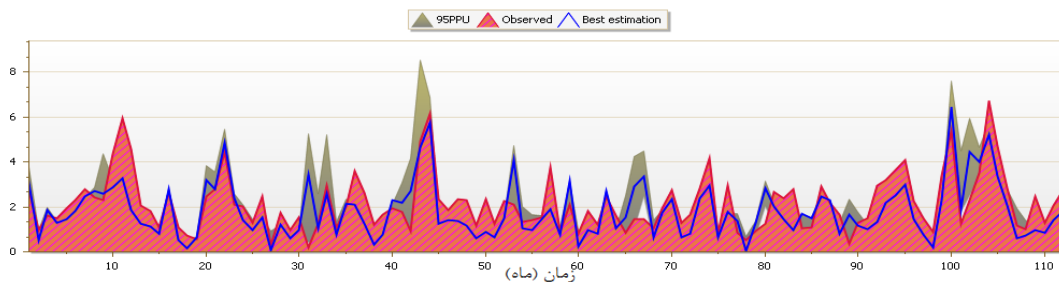
در ARCSWAT منطقه مورد مطالعه به ۲۱ زیرحوضه تقسیم شد (شکل ۴). در این تحقیق مقدار رواناب خروجی از چهار زیرحوضه با استفاده از مدل SWAT مشخص شده است و شبیه‌سازی مدل در خروجی زیرحوضه‌ها نیز برای افزایش دقت با نتایج واقعی بررسی شده و نتایجی که از نقشه hru مدل به-دست می‌آید و مدل برای هریک از زیرحوضه‌ها مشخص می‌کند از دستور کار خارج شد و تنها به بررسی چهار زیرحوضه پرداخته شد. Benaman و همکاران (۲۰۰۵) و Santhi و همکاران (۲۰۰۱) پیشنهاد کردند که شبیه‌سازی مدل زمانی می‌تواند

پارامترها مشخص شد. مقدار بهینه تعیین شده بعد از چندین تکرار به دست آمده است. مقدار بهینه برای پارامتر قابلیت هدایت هیدرولیکی موثر ۹۸ میلی‌متر بر ساعت تعیین شد. مقدار t-stat و p-value برای این پارامتر ۳/۰۲ و ۰/۲۸ به دست آمد که نشان‌دهنده حساسیت بالای این پارامتر می‌باشد. مقدار بهینه برای پارامتر جرم مخصوص ظاهری لایه‌های خاک ۱/۰۸ گرم بر مترمکعب تعیین شد. مقادیر t-stat برای این پارامتر نسبت به پارامتر قابلیت هدایت هیدرولیکی موثر، بالا است اما مقدار p-value برای پارامتر جرم مخصوص ظاهری خاک نسبت به پارامتر قابلیت

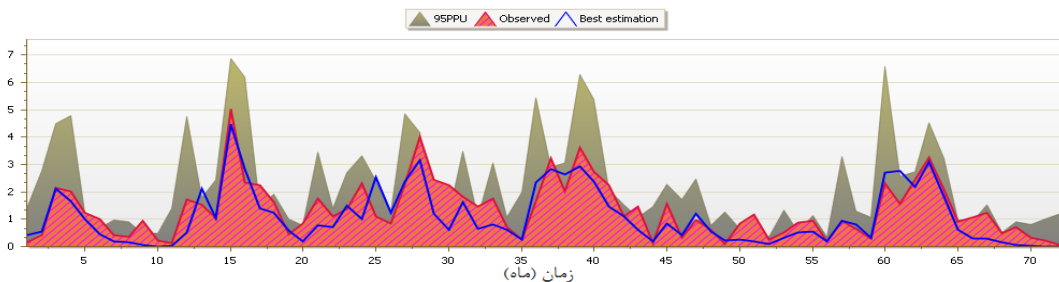
هدایت هیدرولیکی موثر کم می‌باشد. پارامتر ظرفیت رطوبت قابل استفاده لایه‌های خاک بین ۰/۹ تا یک میلی‌متر آب بر میلی‌متر خاک به مدل داده شد که مقدار ۰/۶ برای این پارامتر به عنوان مقدار بهینه مشخص شد. پارامتر ظرفیت رطوبت قابل استفاده لایه‌های خاک در بین پارامترهای دیگر از بالاترین مقدار t-stat برخوردار می‌باشد و مقدار P-value برای این پارامتر صفر به دست آمد که نشان‌دهنده حساسیت بالای مقدار به دست آمده برای این پارامتر است. مقدار پارامتر شماره منحنی برای حوزه آبخیز نکا ۶۸ محاسبه شد.



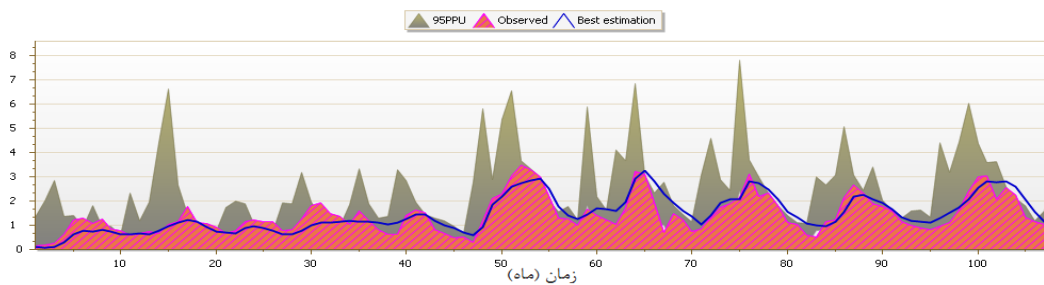
شکل ۴- زیرحوضه‌های منتج از ArcSWAT



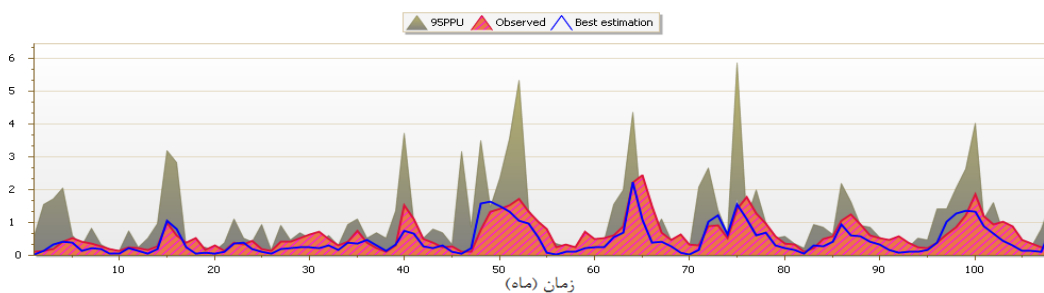
شکل ۵- نتایج حاصل از اجرای مدل در مرحله‌ی واسنجی برای شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه هیدرومتری آبلو



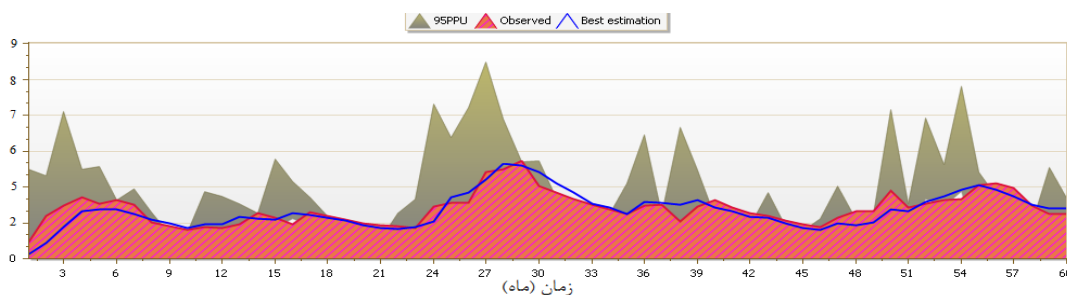
شکل ۶- نتایج حاصل از اجرای مدل در مرحله‌ی واسنجی برای شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه پایین زردین



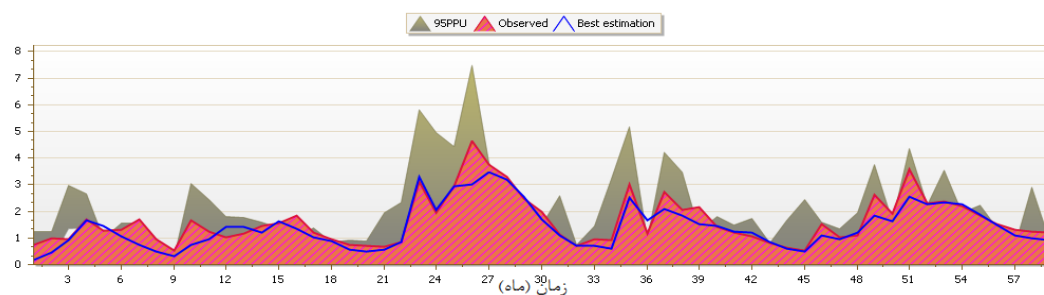
شکل ۷- نتایج حاصل از اجرای مدل در مرحله‌ی واسنجی برای شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه سفیدچاه



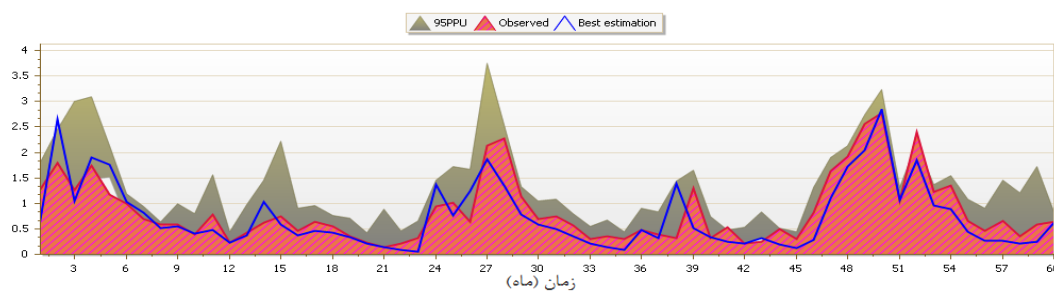
شکل ۸- نتایج حاصل از اجرای مدل در مرحله واسنجی برای شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه کارخانه سیمان



شکل ۹- نتایج حاصل از اجرای مدل در مرحله اعتبارسنجی برای شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه آبلو



شکل ۱۰- نتایج حاصل از اجرای مدل در مرحله اعتبارسنجی برای شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه کارخانه سیمان



شکل ۱۱- نتایج حاصل از اجرای مدل در مرحله اعتبارسنجی برای شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه سفیدچاه

در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی، مدل با مجموعه‌ای از پارامترهای به‌دست آمده از آخرین

مرحله واسنجی و اعتبارسنجی اجرا شد و نتایج نهایی آن در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است.

جدول ۴- خلاصه نتایج مدل در مرحله واسنجی

ایستگاه	طول دوره آماری	R ²	NS	MSE	r-factor	p-factor
آبلو	۱۰۵ ماه	۰/۷۱	۰/۷۶	۲/۰۴	۲/۵۵	۰/۸۵
پایین زرنندین	۷۳ ماه	۰/۸۲	۰/۶۲	۰/۳۵	۲/۰۳	۰/۷۸
سیمان	۱۱۰ ماه	۰/۷۶	۰/۶۹	۵/۳۲	۱/۷۱	۰/۷۸
سفیدچاه	۱۱۰ ماه	۰/۶۳	۰/۷۱	۲/۹۱	۲/۴۳	۰/۸۹

جدول ۵- خلاصه نتایج مدل در مرحله اعتبارسنجی

ایستگاه	طول دوره آماری	R ²	NS	MSE	r-factor	p-factor
آبلو	۶۰ ماه	۰/۸۱	۰/۷۴	۱۲/۱۷	۳/۶۱	۰/۸۷
پایین زرنندین	۵۷ ماه	۰/۶۸	۰/۶۶	۰/۱۲	۲/۲۴	۰/۸۸
سیمان	۵۷ ماه	۰/۷۳	۰/۵۸	۱/۶۸	۳/۵۶	۰/۷۲
سفیدچاه	۶۰ ماه	۰/۶۱	۰/۶۴	۰/۲۱	۱/۷۸	۰/۷۲

مدل SWAT با استفاده از دبی جریان متوسط ماهانه در چهار ایستگاه آبلو، کارخانه سیمان، سفیدچاه و پایین زرنندین واسنجی و اعتبارسنجی شد. هدف اولیه از این مطالعه، بررسی عملکرد مدل SWAT در شبیه‌سازی مقدار رواناب حوزه آبخیز نکا در محل چهار ایستگاه هیدرومتری موجود در داخل حوزه است. در مرحله تحلیل حساسیت از بین پارامترهای مختلف هشت پارامتر که مدل حساسیت بالایی نسبت به آن‌ها نشان داد، به‌منظور واسنجی مدل انتخاب شد. این پارامترها به‌ترتیب اولویت شامل r_SOL_AWC.sol، r_SOL_BD.sol، v_CH_K2.rte، v_RCHARG_DP، r_CN2.mgt، v_GW_DELAY.bsn و v_SURLAG.gw می‌باشند. بالا بودن حساسیت پارامتر r_SOL_AWC.sol نمایان‌گر تأثیرگذاری نرخ ظرفیت رطوبت خاک بر خروجی حوزه آبخیز است. حساسیت پارامتر SOL_BD نشان‌دهنده تأثیرگذاری چگالی خاک در حالت اشباع می‌باشد. همچنین، بالا بودن حساسیت پارامتر v_CH_K2.rte نشان‌دهنده تأثیرگذاری هدایت هیدرولیکی بر مقدار رواناب می‌باشد. با توجه به نمودارها، مقدار دبی اوج برآورد شده به مقدار دبی مشاهده‌ای نزدیک است و در بیشتر موارد کمتر از مقدار دبی اوج مشاهده‌ای می‌باشد که با نتایج حاصل

از مطالعات Osmani و همکاران (۲۰۱۳)، Shimelis و همکاران (۲۰۱۰)، Changnin و همکاران (۲۰۱۰)، Pikounis و همکاران (۲۰۰۳) و Bewket و Tibebe (۲۰۱۰) مطابقت دارد. مقادیر برآورد شده برای متوسط دبی ماهانه به مقادیر مشاهداتی نزدیک می‌باشد و برای ماه‌هایی که درجه حرارت پایین است مقدار دبی برآورد شده بیشتر از مقادیر مشاهداتی می‌باشد. به‌دلیل در نظر نگرفتن نفوذ آب در ماه‌های سرد مقدار دبی شبیه‌سازی شده بیشتر از مقدار دبی مشاهده‌ای می‌باشد. به‌عبارتی مدل بخش عمده‌ای از بارش رخ داده را به‌عنوان رواناب شبیه‌سازی می‌کند و مقدار نفوذ واقعی را کمتر در نظر می‌گیرد و با نتایج حاصل از مطالعات Akbari Mejdari و همکاران (۲۰۱۳) و Hosseini و همکاران (۲۰۱۱)، مطابقت داشته، این مقدار نفوذ واقعی مورد توجه قرار نمی‌گیرد. به‌طور کلی، این مدل می‌تواند ابزار مناسبی در رابطه با شبیه‌سازی شدت جریان رودخانه نکا باشد. استفاده از این مدل یا مدل‌های کامپیوتری دیگر به‌دلیل کاهش هزینه عملیات صحرایی و به‌منظور اندازه‌گیری پارامترهای موردنیاز و به‌ویژه به‌دلیل کاهش زمان مورد نیاز برای تحلیل مسایل، می‌تواند جزو راه-کارهای ممکن به‌منظور ارتقای سطح مدیریت منابع آب و حفظ محیط زیست قلمداد شود. علاوه بر این، با استفاده از این ابزار این امکان برای پژوهشگران و

مدیران اجرایی به‌وجود می‌آید تا سناریوهای مختلف مدیریتی را که امکان اجرای آن‌ها در زمان کوتاه و بدون صرف هزینه سنگین وجود ندارد، مورد ارزیابی قرار داده و با تحلیل نتایج، بهترین تصمیم را اتخاذ نمایند.

منابع مورد استفاده

1. Ababaei, B. and T. Sohrabi. 2009. Assessing the performance of SWAT model in Zayandeh Rud Watershed. *Soil and Water Conservation Research*, 16(3): 41-58 (in Persian).
2. Abbaspour, K.C. 2009. User manual for SWAT-CUP2, SWAT calibration and uncertainty analysis programs. *Journal of Swis Federal Institute of Aquatic Science and Technology*, Eawag, Duebendorf, Switzerland, 1: 1-95.
3. Abbaspour, K.C., J. Yan, 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.
4. Akbari Mejdari, H., A.R. Bahremand, A. Najafinejad and V.B. Sheikh. 2013. Daily flow simulation of Chehelchai river-Golestan province using SWAT model. *Soil and Water Conservation Researches*, 20(3): 253-259 (in Persian).
5. Akhavan, S., J. Abedi kopaei, S.F. Moosavi, K. Abbaspour, M. Afiooni and S.S. Eslamian. 2010. Estimation blue water and green water using SWAT model in Hamedan-Bahar Watershed. *Journal of Water and Soil Science*, 14(53): 9-23 (in Persian).
6. Arefi asl, A., A. Najafinejad., F. Kiani and A. Salman Mahini. 2013. Runoff and sediment simulation using SWAT in Chehel Chai Watershed, Golestan Province. *Journal of Range and Watershed Management*, 66(3): 433-446 (in Persian).
7. Baffaut, C., T.D. Farrand and V.W. Benson. 2005. Potential accuracy of water quality estimates based on noncalibrated swat simulations. 3rd International SWAT Conference, Zurich, Switzerland, 301-309.
8. Benaman, J., C.A. Shoemaker and D.A. Haith. 2005. Calibration and validation of soil and water assessment tool on an agricultural watershed in upstate New York. *Journal of Hydrologic Engineering*, 10(5): 363-374.
9. Bingner, R.L. 1996. Runoff simulation from good win creek watershed using SWAT. *Journal of Transactions of the ASAE*, 59(1): 85-90.
10. Changnin, L., Q. Jianguo, F. Zhaodong Y. Runsheng, Z. Songbin and Z. Feng. 2010. Parameters optimization based on the combination of localization and auto-calibration of SWAT model in a small watershed in Chinese loess plateau. *Journal of Earth Science China*, 4(3): 296-310.
11. Chu, T., A. Shirmohammadi, H. Montas and T. Sohrabi. 2002. Modeling watershed nonpoint source pollution on piedmont physiographic region using swat. *Journal of Transactions of the ASAE*, 22040: 12-38.
12. Ebrahimi, P., K. Soleimani and K. Shahedi. 2013. Investigation lands use changes and its role on floodwater zones in GIS and RS environment, case study: NekaRood. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 5(2): 67-73 (in Persian).
13. Etienne, L., F. Ancil, A. Van Grienseven and N. Beauchamp. 2008. Evaluation of stream flow simulation by swat model for two small watersheds under snowmelt and rainfall. *Hydrological Sciences Journal*, 53(5): 961-976.
14. Gassman, P.W., M.R. Reyes, C.H. Green and J.G. Arno. 2007. Swat: Historical development, applications, and future research directions. *Journal of American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(4): 1211-1250.
15. Holvet, K., A. Vangriensven, P. Seuntjens and P.A. Vanrolleghem. 2005. Sensitivity analysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT. *Journal of Physics and Chemistry of the Earth*, 30: 518-526.
16. Hosseini, M., M. Ghafari, M.R. Tabatabaei, M. Godarzi and S.A. Hejazi. 2013. Evaluation of Runoff Components by SWAT Model in Taleghan Catchment. *Journal of Geography and Planning*, 17(45): 27-41 (in Persian).
17. Hosseini, M., M. Amin, A.M. Ghafouri and M.R. Tabatabaei. 2011. Application of soil and water assessment tools model for runoff estimation. *American Journal of Applied Sciences*, 8(5): 486-494.
18. Jeirani, F., S. Moridi and A. Moridi. 2011. Impact of DEM cell size on calibration and predictions of runoff and sediment, using SWAT-CU P. *Soil and Water Conservation Research*, 18(4): 81-101 (in Persian).
19. Niazi, M., C. Obropta and R. Miskewitz. 2015. Pathogen transport and fate modeling in the Upper Salem River Watershed using SWAT model. *Journal of Environmental Management*, 151: 167-177.

20. Osmani, H., B. Motamed Vaziri and A. Moeini. 2013. Simulation of discharge, calibration and validation of SWAT model, case study: Tehran Latyan dam upstream. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 5(2): 134-143 (in Persian).
21. Panhalkar, S.S. 2014. Hydrological modeling using SWAT model and geoinformatic techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 17: 197-207.
22. Pikounis, M., E. Aranou, E. Baltas, A. Dassaklis and M. Mimikou. 2003. Application of the SWAT model in the pinos River in under different landuse Scenarios. *Global NEST Journal*, 5(2): 71-79.
23. Robert, S.A., W.W. Scott and R.Z. Hans. 2008. Hydrologic calibration and validation of swat in a snow dominated rocky mountain watershed, Montana, U.S.A. *Journal of the American Water Resources Association*, 44(6): 1411-1430.
24. Salajeghe, A. and A. Fazlolahi Aghamaleki. 2011. Modeling and simulation in watershed management, University of Tehran Press, 250 pages.
25. Santhi, C., J.G. Arnold, J.R. Williams, W.A. Dugas and L. Hauck. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(5): 1169-1188.
26. Seo, J.K., T. Sugimura and A.S. Kim. 2015. Open MP-accelerated SWAT simulation using Intel C and FORTRAN compilers: Development and benchmark. *Computers and Geosciences*, 75: 66-72.
27. Shepherd, B., D. Harper and A. Millington. 1999. Modelling catchment scale nutrient transport to watercourses in the U.K. *Journal of Hydrobiology*, 395(396): 227-237.
28. Shimelis, S., B. Dargahi, S. Ragahavan and M.M. Assefa. 2010. Modeling of sediment yield from Anjeni gauged watershed, Ethiopia using SWAT model. *Journal of the America Water Resources Association*, 46(3): 514-526.
29. Sun, H. and P.S. Cornish. 2005. Estimating shallow groundwater recharge in the headwaters of the liverpool plains using SWAT. *Journal Hydrological Process*, 19(3): 795-807.
30. Tibebe, D. and W. Bewket. 2010. Surface runoff and soil erosion estimation using the SWAT mode in the Kelata watershed, Ethiopia. *Land Degradation and Development Wiley Library*, 22(6): 551-564.
31. Tolson, B.A. and C.A. Shoemaker. 2004. Watershed modeling of the cannonsville basin using SWAT 2000: Model development, calibration and validation for the prediction of flow, sediment and phosphorus transport to the cannonsville reservoir. Technical Report, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, 159 pages.
32. Van Liew, M.W., J.D. Garbrecht and J.G. Arnold. 2003. Simulation of the impacts of flood retarding structures on stream flow for a watershed in southwestern Oklahoma under dry, average and wet climatic conditions. *Journal of Soil and Water Conservation*, 58(6): 340-348.
33. Yesuf, M.H., M. Assen, T. Alamirew and A. Melesse. 2015. Modeling of sediment yield in Maybar gauged watershed using SWAT, Northeast Ethiopia. *Catena*, 127: 191-205.

Calibration and validation of SWAT Model in runoff simulation, case study: Neka Watershed

Payam Ebrahimi^{*1}, Jamileh Salimi Kouchi², Mohsen Mohseni Saravi³

¹ PhD, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran, ² PhD, Watershed Management Group, Forests, Range and Watershed management Organization, Tehran, Iran and ³ Professor, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran

Received: 23 October 2016

Accepted: 02 January 2017

Abstract

SWAT is a continuous, physically based and distributed hydrologic model which all several hydrological processes like discharge, sediment yield nitrogen are simulated for each one of it. 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 Neka Watershed in Mazandaran Province. Four indices were used to assess the goodness of calibration, viz., P-factor, R-factor, R^2 and Nash-Sutcliffe (NS). Runoff data (1995-2004) of four hydrometry stations were used for calibration and (2005-2009) for validation of this watershed. The results of these values for flows at four stations for calibration process in Ablo, Pain zarandin, Karkhane siman and Sefid chah were 0.85, 0.78, 0.78, 0.89 for P-factor; 2.55, 2.03, 1.71, 2.43 for R-factor; 0.76, 0.62, 0.69, 0.71 for Nash-Sutcliffe and 0.71, 0.82, 0.76, 0.63 for R^2 . The results of validation were 0.87, 0.88, 0.72, 0.72 for P-factor; 3.61, 2.24, 3.56, 1.78 for R-factor; 0.74, 0.66, 0.58, 0.64 for Nash-Sutcliffe (NS) and 0.81, 0.68, 0.73, 0.61 for R^2 respectively. In general, the results showed that SWAT could be a proper tool for simulating the flow rate values of the Neka Watershed.

Key words: Calibration, Neka Watershed, Runoff, SWAT model, Validation

* Corresponding author: ebrahimi1393@ut.ac.ir