SWAT-CUP: تکامل مدل‌سازی هیدرولوژیکی و تحلیل عدم قطعیت

آرمین تبری[۱]، مائده قربان‌پور دلیوند*[۲]

چکیده:

سیستم SWAT-CUP به عنوان یک چارچوب یکپارچه برای کالیبراسیون، تحلیل عدم قطعیت و بهینه‌سازی پارامترهای مدل هیدرولوژیکیSWAT، نقش حیاتی در مدیریت منابع آب و خاک ایفا می‌کند. این مقاله با مرور جامع ادبیات، به بررسی اصول، کاربردها، مزایا و محدودیت‌های این سیستم می‌پردازد. یافته‌ها نشان می‌دهد SWAT-CUP با بهره‌گیری از الگوریتم‌هایی نظیر SUFI-2، ParaSol، PSO، GLUE و MCMC قابلیت شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای هیدرولوژیکی (مانند رواناب، فرسایش خاک و کیفیت آب) را در مقیاس‌های زمانی مختلف داراست. همچنین، مطالعات موردی تأیید می‌کنند که ادغام داده‌های ماهواره‌ای و تکنیک‌های هوشمند مانند (ANN) می‌تواند دقت مدل را بهبود بخشد. با این حال، چالش‌هایی نظیر پیچیدگی تحلیل جریان پایه، نیاز به داده‌های ورودی با کیفیت بالا و محدودیت در شبیه‌سازی مناطق شهری، نیازمند توسعه‌های آینده است. کاربست این سیستم در مدیریت پایدار حوضه‌های آبخیز، به‌ویژه در شرایط تغییر اقلیم و تنش آبی، ضروری به نظر می‌رسد.

واژگان کلیدی:

SWAT-CUP، کالیبراسیون مدل هیدرولوژیکی، تحلیل عدم قطعیت، بهینه‌سازی پارامترها، مدیریت منابع آب، حوضه آبخیز

[۱]. دانش آموخته مهندسی طبیعت، دانشگاه منابع طبیعی، دانشگاه گیلان

[۲]*. دانش آموخته دکتری علوم و مهندسی مرتع، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری. (نویسنده مسئول: maede.ghorbanpour@gmail.com)

۱. مقدمه

هیدرولوژی علم مطالعه آب در زمین است؛ تحقیق در ارتباط بین گردش آب و خاک و سیستم های ارزیابی هیدرولوژیکی، درک بهتری از چرخه آب و مدیریت بهینه منابع آب را فراهم می‌کنند. بارش‌ها منبع اصلی آبی برای تامین آب شیرین مورد نیاز برای رشد گیاهان و امور کشاورزی است. در دهه‌های اخیر، متاسفانه به خاطر تغییرات کاربری اراضی و تخریب اکوسیستم‌ها... تغییرات معنادار در الگوهای بارش مشاهده شده است که نتیجه آن خشک شدن منابع آب زیرزمینی است که امر بسیار زیان‌بار می‌باشد (کیانی مجد، ۲۰۲۳).

به همین علت استفاده از مدل‌ها و سیستم‌های هیدرولوژی مثل SWAT-CUP که در پیش‌بینی و جلوگیری از خشکی و سیل و استفاده بهینه از منابع آبی توصیه می‌شود. ازبین همه سیستم های هیدرولوژی، این سیستم به یکی از دقیق‌ترین مدل‌ها و پر جزئیات‌ترین در نظر گرفته شده است (Kofidou, همکاران. ۲۰۲۳). این مدل بیشترین فاکتورهای اثر گذار را در نظر می‌گیرد، در نتیجه احتمال خطا توسط فاکتوری ناشناخته کمتر می‌شود (Mei و همکاران. ۲۰۲۳). سیستم SWAT-CUP به دلیل اینکه هرز آب و رابطه بین عوامل آبی و خاکی تا شناسایی مناسب‌ترین آبخیز برای استفاده، استفاده بهینه بدون ازبین بردن منابع طبیعی و شناسایی آلودگی‌ها و اطمینان از اینکه محصولات بدست آمده از آبخیزها به اندازه‌ای باشد که نیازهای مردم را برطرف و منابع طبیعی را حفظ کند، یکی از مورد بحث‌ترین مدل‌های هیدرولوژی است. مانند همه سیستم‌ها، این سیستم بدون نقص و صددرصد دقیق نیست؛ ولی با این وجود می‌توان آن را با روش‌های مختلف مثل استفاده از مدل‌های دیگر مانند ANN در کنار آن در جهت اطمینان از دقت آن یا استفاده از عوامل و داده‌های دیگر مثل داده‌های حاصل از ماهواره‌ها، مقدار بارش و در مناطق مسکونی را بهبود بخشید. مزیت این سیستم هیدرولوژی این است که با داده‌ها و و مدل‌های دیگر می‌توان دقت مدل را افزایش داد تا نتایج درست‌تری به‌دست آید.

۲. روش پژوهش

این مطالعه از روش مرور نظام‌مند ساختاریافته با رویکرد تلفیقی-تحلیلی پیروی می‌کند. ابتدا پروتکل پژوهشی جامع شامل تعریف پرسش‌های تحقیق، معیارهای شمول/خروج (سال انتشار: ۲۰۱۳–۲۰۲۴، زبان: انگلیسی و فارسی، انواع مطالعات: کیفی، کمی، و مروری)، و استراتژی جستجوی کلیدواژه‌محور در پایگاه‌های علمی معتبر مانند Scopus, Web of Science, ScienceDirect Magiran, SID تدوین گردید. پس از اجرای جستجوی اولیه و حذف موارد تکراری، فرآیند غربالگری دو مرحله‌ای (بررسی عنوان/چکیده و ارزیابی متن کامل) توسط دو محقق برای تضمین قابلیت اطمینان انجام شد. داده‌های کیفی و کمی از مقالات واجد شرایط گردآوری و سپس در قالب تحلیل موضوعی و ترکیب تفسیری سازماندهی گردید. یافته‌ها با توجه به نقاط قوت/ضعف شواهد موجود، الگوهای نوظهور، و تناقضات میان پژوهش‌ها تحلیل انتقادی شدند تا به پیشنهادات کاربردی برای پژوهش و عمل منجر گردد.

۳. معرفی سیستم SWAT-CUP

سیستم SWAT-CUP یکی از قدرتمندترین سیستم‌های هیدرولوژی است که به تخمین پارامترهای مدل هیدرولوژی SWAT از طریق بهینه‌سازی تطبیقی می‌پردازد. این سیستم قابلیت ارزیابی و بهینه‌سازی بر روی پارامترهای حساس مدل را دارد (کیانی مجد، ۲۰۲۳). سیستم SWAT-CUP در آمریکا توسط سرویس تحقیقات کشاورزی ایالات متحده ساخته شده و توانایی مدل‌سازی با استفاده از منابع وسیعی از داده‌ها را برای ارزیابی آب و خاک دارد. این سیستم به تجزیه و تحلیل شرایط طیف وسیعی از عوامل تأثیرگذار بر آب و خاک در بازه‌های زمانی روزانه، ماهانه و سالانه می‌پردازد و همچنین تأثیر عوامل آب و هوایی بر رواناب‌ها را تعیین می‌کند (کیانی مجد، ۲۰۲۳). اما مدل‌سازی و پیش‌بینی به تنهایی کافی نیست؛ مدیریت صحیح و استفاده بهینه از منابع آبی و خاکی نیز الزامی است (Muhindo و همکاران، ۲۰۲۳).

برای استفاده از سیستمSWAT-CUP، داشتن دانش کافی درباره چرخه پیوسته هیدرولوژی ضروری است و به دست آوردن چنین اطلاعاتی نیازمند روش‌های متنوعی است. به دلیل اختلاف بین متخصصان در این موضوع، جریان هیدرولوژی در مکان‌ها و زمان‌های مختلف ممکن است متفاوت باشد و وجود احتمالات زیاد در این رویکرد نیز به پیچیدگی این مسئله می‌افزاید (Mariani و همکاران، ۲۰۲۴). یکی از چالش‌های مدل‌های هیدرولوژی، تعیین سطح پیچیدگی آن‌ها است. اگر مدل‌ها بیش از حد پیچیده باشند، احتمال خطا افزایش می‌یابد و در عوض، اگر ساده باشند، نتایج غیر دقیق خواهند بود. به این ترتیب، مدل SWAT به دلیل دسترسی آسان به داده‌ها و توانایی شناسایی عوامل مشکل‌ساز، از جمله آلودگی‌های آبی و روش‌های نادرست زراعت که به منابع طبیعی آسیب می‌رساند، یکی از دقیق‌ترین و مؤثرترین مدل‌ها محسوب می‌شود. این مدل به جلوگیری از استفاده غیربهینه و نابودی منابع حیاتی کمک می‌کند و بدین ترتیب در مدیریت پایدار آب و خاک نقشی کلیدی ایفا می‌کند. اما فقط مدل‌سازی و پیشبینی تا تصمیم‌گیری در نحوه درست و بهینه منابع آب و خاک به تنهایی کافی نیست؛ بلکه مدیریت درست و استفاده بهینه نیز نیاز است (Muhindo و همکارن، ۲۰۲۳).

ابزار ارزیابی خاک و آب رویه‌های کالیبراسیون و عدم قطعیت، یک چارچوب مدل‌سازی است که برای شبیه‌سازی کیفیت و کمیت آب در حوزه‌های آبخیز استفاده می‌شود. در اینجا به مروری بر مفاهیم اصلی مربوط به SWAT-CUP می‌پردازیم (Hosseini و همکاران. ۲۰۲۰):

۱. **مدل‌سازی حوضه SWAT-CUP:** شامل نمایش فرآیندهای هیدرولوژیکی و ویژگی‌های کاربری اراضی یک حوزه آبخیز خاص است. این حرکت آب و آلاینده‌های مرتبط مانند مواد مغذی و رسوبات را برای ارزیابی تاثیر آنها بر کیفیت آب شبیه سازی می کند.
۲. **کالیبراسیون:** کالیبراسیون به فرآیند تنظیم پارامترهای مدل برای بهبود عملکرد آن در تکرار داده‌های مشاهده شده اشاره دارد. SWAT-CUP از تکنیک‌های آماری مختلفی مانند الگوریتم برازش عدم قطعیت متوالی (SUFI-2) برای کالیبره

کردن مدل و یافتن مقادیر پارامتر بهینه که بهترین تناسب بین داده‌های مدل‌شده و مشاهده‌شده را فراهم می‌کند، استفاده می‌کند.

۳. **تجزیه و تحلیل عدم قطعیت:** تجزیه و تحلیل عدم قطعیت در SWAT-CUP شامل کمی کردن عدم قطعیت مرتبط با پیش‌بینی‌های مدل و برآورد پارامترها است. این تحلیل به درک قابلیت اطمینان و استحکام مدل و خروجی‌های آن کمک می‌کند. SWAT-CUP از روش‌هایی مانند نمونه‌برداری لاتین Hypercube و تخمین عدم قطعیت احتمال تعمیم یافته (GLUE)برای کشف فضای عدم قطعیت و نتیجه‌گیری معنادار استفاده می‌کند.

۴. اصول و کاربردهای سیستم SWAT-CUP

سیستم SWAT-CUP بر اساس اصول بهینه‌سازی مدل هیدرولوژی SWAT عمل می‌کند و قابلیت‌های متنوعی را برای تحلیل و ارزیابی منابع آب و خاک ارائه می‌دهد. این سیستم در مطالعات مختلفی نظیر برآورد جریان آب، تخمین خاکریز، فرسایش آبی، سرعت آب، اثر بارش، برآورد آب‌های زیرزمینی و تحلیل حساسیت پارامترها کاربرد دارد. این مدل نه تنها به اندازه‌گیری رواناب می‌پردازد، بلکه قادر است فعالیت‌های غیرطبیعی و ناشی از انسان را مدل‌سازی کند، از جمله آلودگی آبی، میزان برداشت آب، ساخت سد، آبیاری و پیش‌بینی اثرات این فعالیت‌ها بر آبخیزها در صورت ادامه الگوهای موجود. دسترسی آسان به مدل SWAT، این فرآیند را تسهیل می‌کند؛ با این حال، میزان داده مورد نیاز برای ارزیابی دقیق، به دلیل حجم بالای اطلاعاتی که نیاز است، همیشه قابل پیش‌بینی نیست (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴).

یکی از مزایای این مدل، تقسیم‌بندی مناسب و توانایی اندازه‌گیری مقدار آلودگی تولید شده است که به ارزیابی دقیق‌تر آسیب‌های محیط‌زیستی کمک می‌کند. همچنین از داده‌های توپوگرافی برای بررسی تأثیرات خاکی و شناخت فرآیند فرسایش و تولید خاک استفاده می‌شود. روابط بین آب و خاک در این فرآیندها نقشی کلیدی ایفا می‌کند، چرا که محیط زیست به‌خاطر کنش و واکنش‌های متنوع عوامل مختلف تحت تأثیر قرار می‌گیرد. معمولاً فعالیت‌های انسانی باعث تشدید تغییرات و دگرگونی‌های اکولوژیکی در اکوسیستم‌ها می‌شود و اگر این موارد در ارزیابی‌ها مورد توجه قرار نگیرند، منجر به مدیریت نادرست و استفاده غیر بهینه از منابع خواهد شد (Janjić و همکاران، ۲۰۲۳).

۵. محاسن و محدودیت‌های سیستم SWAT-CUP

از مزایای سیستم SWAT-CUP می‌توان به دقت بالای آن در تخمین پارامترها، قابلیت انعطاف‌پذیری در استفاده و امکان سفارشی‌سازی پارامترها اشاره کرد. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که سیستم برای تحلیل‌های مختلف و متناسب با نیازهای خاص هر پروژه کاربردی باشد. با این حال، این سیستم مانند هر سیستم دیگری کامل و بدون مشکل نیست و دارای محدودیت‌هایی است که باید در نظر گرفته شوند.

یکی از محدودیت‌ها این است که با وجود اشکالات موجود، همواره جای بهبود در مدل SWAT-CUP وجود دارد. به عنوان مثال، اندازه‌گیری رواناب رودخانه می‌تواند به متخصصان کمک کند تا تغییرات اقلیمی و تأثیرات آن بر تخلیه رواناب و همچنین تغییرات

محیطی نظیر تغییرات ژئولوژیکی را شناسایی نمایند. این تغییرات می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر بخش آبی داشته باشند و شناخت حساس‌ترین پارامترها در این زمینه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Kofidou و همکاران، ۲۰۲۳).

همچنین، به دلیل وجود عوامل متعدد و درک ناکافی از عوامل فیزیکی، ممکن است اشکالاتی در مدل ایجاد شود (آقاخانی و همکاران، ۲۰۲۰). یکی از روش‌های پیشنهادی برای بهبود داده‌ها، استفاده از فناوری‌های ماهواره‌ای است؛ زیرا داده‌های سنجش از دور (مانند تصاویر ماهواره‌ای) پوشش فضایی وسیعی فراهم می‌کنند، اما محدودیت‌هایی نظیر وضوح زمانی نامناسب (Resolution Temporal) برای پایش بلایای سریع‌الوقوع (مانند سیل) و خطاهای ناشی از پوشش ابری وجود دارد. این تغییرات ممکن است اطلاعات مربوط به محیط را به شدت تحت تأثیر قرار دهند و عدم ثبت مجدد تصاویر ممکن است به داده‌های نادرست یا ناکامل منجر شود.

در نهایت، تکنیک‌های معمولی که برای بهبود مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل PSO (Particle Swarm Optimization)، GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation)، SUFI-2(Sequential Uncertainty Fitting)، Markov chain MCMC (Monte Carlo)، ParaSol (Parametric Solutions) و SWAT-CUP Premium هستند. این تکنیک‌ها برای بررسی و برآورد عدم قطعیت‌ها در مدل‌ها استفاده می‌شوند (Kim و همکاران، ۲۰۲۳). با وجود ایرادات ذکر شده همیشه جا برای بهبود مدل SWAT-CUP وجود دارد. مثلاً اندازه گیری رواناب رودخانه می‌تواند به متخصان کمک کند تا تغییرات اقلیمی‌ای که تخلیه روان‌آب می‌تواند برای اندازه‌گیری تغییرات محیطی مثل تغییرات زمین شناسی که بر بخش آبی تاثیر دارد و در نظر گرفتن حساس‌ترین پارامترها، را شناسایی کنند (Kofidou و همکاران. ۲۰۲۳).

راه دیگر برای بهبود داده‌ها، استفاده از ماهواره‌ها است؛ زیرا ماهواره‌ها از بالا به پایین می‌توانند مساحت وسیعی از زمین را عکس‌برداری و اسکن کنند، هرچند ماهواره‌ها فقط در زمانی مشخص عکس می‌گیرند، به معنی آنکه اگر تغییری شدید مثل سیل یا زلزله اتفاق بیفتد، به علت تغییرات آبی و خاکی که این گونه اتفاقات در حد وسیع ایجاد می‌کنند و یا بلایای طبیعی دیگر از خشکسالی گرفته تا یخچال‌سازی و تغییرات فصلی، دوباره باید عکس برداری شود. زیرا چنین تغییراتی دید ماهواره را به زمین مسدود کرده و اگر دوباره عکس‌برداری نشود ممکن است به اطلاعات غلط یا نیمه کامل منجر شود.

۶. مطالعات موردی با استفاده از سیستم SWAT-CUP

در این بخش، برخی از مطالعات موردی که با استفاده از سیستم SWAT-CUP انجام شده است را بررسی می‌کنیم. این مطالعات نشان می‌دهند که با استفاده از این سیستم می‌توان به نتایج دقیق و قابل اعتمادی در تحلیل‌های هیدرولوژی رسید؛

Scott-Shaw و همکاران (۲۰۲۲) به ارزیابی بازگردانی تالاب‌ها در آفریقای جنوبی پرداختند. این پژوهش در حوضه رودخانه uMngeni، آفریقای جنوبی انجام شد. مدل SWAT با SWAT-CUP و الگوریتم SUFI-2 کالیبره شد و ضریب همبستگی ۰/۸۷ و NS=۰.۸ به دست آمد. نتایج نشان داد بازگردانی تالاب و ایجاد نوار حفاظتی ۲۰ متری می‌تواند تا ٪۱۶ رواناب سالانه را افزایش دهد و در برخی واحدهای هیدرولوژیک تا ٪۶۰ افزایش مشاهده شد. حذف گونه‌های تجاری چوب و نیشکر از مناطق تالابی تأثیر مثبت بر منابع آب دارد.

Misaghi و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای با عنوان شبیه‌سازی نیتروژن و فسفر در حوضه زنجانرود (ایران) با استفاده از سیستم SWAT-CUP، حوضه آبریز زنجانرود، پرداختند. در این پژوهش مدل SWAT-CUP با الگوریتم SUFI-2 برای کالیبراسیون و تحلیل عدم قطعیت به کار رفت. نتایج نشان داد که تغییر روش آبیاری تأثیر قابل توجهی بر کاهش آلودگی نیترات و فسفات ندارد، اما کاهش

مصرف کود شیمیایی تا ٪۵۰ منجر به کاهش ٪۱۶/۷ نیترات و ٪۱۹/۲ فسفات در آب شد. افزایش کوددهی تا ٪۵۰ باعث افزایش مشابه آلودگی گردید. مدیریت مصرف کود نقش کلیدی در کنترل آلودگی منابع آب دارد.

آقاخانی و همکاران (۲۰۲۰) واقع در شمال ایران، استان مازندران در تحقیقاتشان درمورد مطالعه با تمرکز بر آنالیز عدم قطعیت پارامترهای مدل از از زیرحوضه‌های مهم حوزه تلار، محدوده‌های پارامترهای پیشین در سناریوی S1 با کمک واسنجی نهایی محدوده پارامترها در نرم افزار SWAT-CUP و الگوریتم SUFI-2 مشخص و محدوده‌های پیشین در سناریوی S2 با استفاده از یک رویکرد ترکیبی بین محدوده‌های پارامترهای پیشین در برنامه SWAT-CUP و محدوده‌های پسین در سناریوی S1 مشخص شده و به منظور نمایش یک جمعیت اولیه از پارامترها (توزیعات پیشین) به کار گرفته شد.

Ellawidana و Champa (۲۰۱۸) به منظور شبیه‌سازی جریان یک مدل SWAT (شامل ۴۳ زیرحوضه) راه اندازی، کالیبره و اعتبارسنجی کردند. سال‌های آماری مورد استفاده برای گرم کردن مدل (Warm-up) بین ۱۹۸۳ تا ۱۹۸۹ بود و آمار سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۴ برای اعتبارسنجی استفاده کردند. دبی اندازه گیری شده ماهانه در یک مکان با استفاده از تکنیک‌های برازش عدم قطعیت متوالی نسخه ۲ (SUFI-2) کالیبره شد. عملکرد کالیبراسیون با استفاده از پنج تابع هدف شامل ضریب تعیین(R^2) ، ضریب P-factor ،ضریب نش- ساتکلیف(NS) ، ضریبR-factor و ضریب تعیین تقسیم بر ضریب رگرسیون (bR2) مورد ارزیابی قرار دادند. این مدل جریان را به مدت ۲۲ سال شبیه سازی کرد. پارامتر شماره منحنی (CN2) مدل به عنوان حساس‌ترین و بحرانی‌ترین پارامتر (که همبستگی مثبت با رواناب داشت) شناسایی شد.کالیبراسیون مدل مدل کالیبره‌شده ممکن است با داده‌های دبی رودخانه اندازه‌گیری شده در مکان‌های دیگر (در صورت وجود و در صورت وجود) بیشتر بهبود یابد. این مدل را می‌توان بیشتر برای تجزیه و تحلیل استفاده کرد: اثرات تغییرات آب و هوایی و کاربری زمین، بازده رسوب، کیفیت آب و خطر سیل.

Ha و همکاران (۲۰۱۷) با بررسی کالیبراسیون فرآیندهای هیدرولوژیک با داده‌های سنجش از دور در ویتنام در حوضه رودخانهDay ، ویتنام پرداختند. در این مطالعه، داده‌های بارش، تبخیر و شاخص سطح برگ (LAI) سنجش از دور برای بهبود کالیبراسیون مدل SWATبا SWAT-CUP مورد استفاده قرار گرفت. این رویکرد منجر به بهبود شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیک در حوضه‌های فاقد داده‌های کافی شد و برای ارزیابی خدمات اکوسیستمی مفید واقع شد.

غلامی و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی، روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی برای اندازه‌گیری پارامترها و پیش‌بینی خطاها مدل های هیدرولوژیکی را بررسی کردند. در این مطالعه مدل نیمه توزیع شده خاک و آب سنجش SWAT و SWAT-CUP با استفاده از برنامه SUFI-2اعمال شد. پس از جمع آوری داده‌ها، کل حوزه آبخیز تلار در بخش مرکزی رشته کوه های البرز، شمال ایران به ۲۱۹ واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) در ۲۳ زیرحوضه تفکیک شد.به منظور بهبود پارامترهای شبیه‌سازی و به دست آوردن همبستگی بهتر مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده، پارامترهای حساس اعتبارسنجی شدند تا در نهایت مقدار قابل قبول R^2 وNash-Sutcliffe به دست آید. در نتیجه، پارامتر CN2 که در مرحله اولیه این تحقیق حیاتی بود، با پارامتر SOL-K (لایه‌های خاک اشباع با هدایت الکتریکی) به‌عنوان پارامتر بحرانی در مرحله بعدی جایگزین شد. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که مدلSWAT می تواند ابزاری موثر و مفید برای ارزیابی و مدیریت بهینه منابع آب و خاک باشد.

Osmani و همکاران (۲۰۱۳)، در بالادست سد لتیان، تهران، مطالعه‌ای تحت عنوان شبیه‌سازی دبی، کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل SWAT انجام دادند. این محققین با استفاده از SWAT-CUP و الگوریتمSUFI-2 ، ۱۴ پارامتر حساس شناسایی و مدل برای

دوره ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۷ کالیبره و اعتبارسنجی شد. شاخص‌های R^2 و NS به ترتیب برای دوره کالیبراسیون ۰/۹۱ و ۰/۸۸ و برای دوره اعتبارسنجی ۰/۹۲ و ۰/۹۲ به دست آمد که بیانگر دقت بالای مدل در شبیه‌سازی جریان خروجی است.

۷. نکات کلیدی در استفاده از سیستم SWAT-CUP

هنگام استفاده از سیستم SWAT-CUP، باید توجه داشت که داده‌های قابل استفاده مطمئن و دارای کیفیت بالایی باشند. همچنین باید نتایج به دست آمده را با دقت بررسی و تحلیل کرد و در نظر داشت که نتایج نمایش داده شده تنها بر اساس پارامترهای ورودی است (Mariani و همکاران، ۲۰۲۴).

۸. بحث و نتیجه‌گیری

۸. ۱. قابلیت‌های کلیدی و اثربخشی SWAT-CUP

سیستم SWAT-CUP به‌عنوان چارچوبی یکپارچه برای کالیبراسیون، تحلیل عدم قطعیت و بهینه‌سازی پارامترهای مدل هیدرولوژیکی SWAT، ابزاری ضروری در مدیریت پایدار منابع آب و خاک شناسایی شده است. این سیستم با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته‌ای نظیر SUFI-2 (برازش عدم قطعیت متوالی) و GLUE (تخمین عدم قطعیت تعمیمیافته)، توانایی شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای پیچیده هیدرولوژیکی شامل رواناب سطحی، نفوذ آب به خاک، فرسایش رسوبات، و کیفیت آب در مقیاس‌های زمانی روزانه تا سالانه را داراست (کیانی مجد، ۲۰۲۳؛ Hosseini و همکاران، ۲۰۲۰) .مطالعات موردی متعدد (مانند پژوهش Padmaja (۲۰۲۲) در حوضه‌های شهری با R^2=0.97 و NS=0.96) تأیید می‌کند که ادغام داده‌های ماهواره‌ای و تکنیک‌های هوش مصنوعی (مانندANN) می‌تواند دقت پیش‌بینی‌های مدل را به‌طور معناداری افزایش دهد. این ویژگی‌ها، SWAT-CUP را به‌ویژه در شرایط تغییر اقلیم و تنش آبی، به ابزاری حیاتی برای پیش‌بینی اثرات خشکسالی، سیلاب و تخریب اکوسیستم‌ها تبدیل کرده است.

۸. ۲. محدودیت‌ها و چالش‌های پیش‌رو

با وجود مزایای چشمگیر، SWAT-CUP با چالش‌های ساختاری و عملیاتی روبروست:

- **پیچیدگی تحلیل جریان پایه (**Baseflow**):** مدل در شبیه‌سازی جریان‌های زیرسطحی به‌دلیل ناهمگنی داده‌های آب زیرزمینی و وابستگی به پارامترهای حساس (مانند SOL_K و CN2) با عدم قطعیت بالا مواجه است (Kim و همکاران، ۲۰۲۳).

- **محدودیت داده‌های ورودی**: نیاز به داده‌های با وضوح زمانی و مکانی بالا (مانند تصاویر ماهواره‌ای) که تحت تأثیر پوشش ابری یا وقایع سریع‌الوقوع (سیل، زلزله) دچار نقصان می‌شوند.

- **شبیه‌سازی مناطق شهری**: پیچیدگی سطوح نفوذناپذیر، سیستم‌های زهکشی مصنوعی و فعالیت‌های انسانی، دقت مدل را در حوضه‌های شهری کاهش می‌دهد (Mariani و همکاران، ۲۰۲۴).
علاوه بر این، وجود تناقض در تعریف "پارامترهای بهینه" میان متخصصان (به‌ویژه در کالیبراسیون) و وابستگی نتایج به صحت داده‌های اولیه، از موانع کلیدی در تعمیم‌پذیری مدل محسوب می‌شود.

۳-۸- راهکارهای آینده و جهت‌گیری‌های پژوهشی

برای غلبه بر محدودیت‌ها، سه محور توسعه‌ای پیشنهاد می‌شود:
۱. **ادغام چندمدلی (Model Coupling)**: ترکیب SWAT-CUP با مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی (مانند ANN یاLSTM) جهت بهبود شبیه‌سازی جریان پایه و کاهش عدم قطعیت پارامترها (Mei و همکاران، ۲۰۲۳).
۲ .**به‌کارگیری فناوری‌های نوین** :استفاده از سنجش از دور با وضوح زمانی بالا (ماهواره‌های Sentinel) و اینترنت اشیا (IoT) برای پایش لحظه‌ای پارامترهای کیفی آب و خاک (Kofidou و همکاران، ۲۰۲۳).
۳ .**توسعه چارچوب‌های انطباق‌پذیر** :طراحی ماژول‌های ویژه برای مناطق شهری با درنظرگرفتن متغیرهای انسانی مانند تراکم جمعیت، الگوی مصرف آب و قوانین محیط‌زیست.
این راهکارها نه‌تنها قابلیت اطمینان مدل را افزایش می‌دهد، بلکه آن را به ابزاری کارآمد در تحقق **اهداف توسعه پایدار** (SDGs)، به‌ویژه در حوضه‌های آبخیز تحت فشار تغییرات اقلیمی تبدیل می‌کند. در نهایت، کاربست SWAT-CUP در مدیریت یکپارچه منابع آب، مستلزم تعامل بین‌رشته‌ای میان هیدرولوژیست‌ها، سیاست‌گذاران و جامعه محلی است.

۹. جمع‌بندی کلی:

مدل SWAT-CUP مدل بی نقصی نیست و مانند هر مدلی نقص های خود را دارد مانند سختی در آنالیز جریان پایه، با این حال مزیت‌های بسیاری همانند دقت بالا تا دسترسی آزاد و در نظر گرفتن مهم‌ترین فاکتورهای تاثیر گذار را داراست و همواره این مدل ظرفیت بهبود بیشتری نیزدارد؛ مثلاً به غیر از اندازه‌گیری مقدار آب اضافه می‌توان مقدار آب حاصل از بارش‌ها در یک دوره زمانی مشخص را نیز اندازه‌گیری کرد تا عوامل اقلمی و رطوبتی نیز در نظر گرفته شوند.

منابع:

۱. کیانی مجد, نهتانی, دهمرده قلعه نو, & شیخ. (۲۰۲۳). شبیه سازی رواناب حوضه های آبخیز مناطق خشک در مقیاس ماهانه با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوضه آبخیز لار). *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز (علمی-پژوهشی)*, ۱۴(۲۷), ۱۳۵-۱۴۵.

۲. محمدی، م.، کاویان، ع. ا.، غلامی، ل. (۱۳۹۴). مروری بر کاربرد مدل SWAT با تأکید بر ارزیابی اثر تغییرات کاربری اراضی و بهترین شیوه‌ی مدیریتی در مقیاس حوزه‌ی آبخیز. نشریه ترویج و توسعه حوضه آبخیز. ۳(۸): ۳۹-۴۵.

3. Ellawidana, E. W. D. M. and Champa Navaratne. “Stream Flow Modeling In Gin River Basin Using Swat Cup.” (2018).
4. G., Padmaja and Giridhar M.V.S.S. “Calibration and Uncertainty Analysis of Hussainsagar Watershed using SWAT-CUP, Sufi -2 Approach.” Ecology, Environment and Conservation (2022): n. pag.
5. Gholami, Abbas et al. “Hydrological stream flow modeling in the Talar catchment (central section of the Alborz Mountains, north of Iran): Parameterization and uncertainty analysis using SWAT-CUP.” Journal of Water and Land Development 30 (2016): 57 - 69.
6. Ha, L. T., Bastiaanssen, W. G., van Griensven, A., van Dijk, A. I., & Senay, G. B. (2017). SWAT-CUP for calibration of spatially distributed hydrological processes and ecosystem services in a Vietnamese river basin using remote sensing. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, *2017*, 1-35.
7. Hosseini, S., & Khaleghi, M. (2020). Application of SWAT model and SWAT-CUP software in simulation and analysis of sediment uncertainty in arid and semi-arid watersheds (case study: the Zoshk–Abardeh watershed). Modeling Earth Systems and Environment, 1-11. https://doi.org/10.1007/s40808-020-00846-2.
8. Janjić, Josip, and Lidija Tadić. "Fields of Application of SWAT Hydrological Model—A Review." Earth 4.2 (2023): 331-344.
9. Kim, Jong-Tae, Chang-Hun Lee, and Namjoo Lee. "Improvement and Analysis for Accuracy of Baseflow Using SWAT-CUP Premium in the Yongjeon Stream, South Korea." Pure and Applied Geophysics (2023): 1-15.
10. Kofidou, Maria, and Alexandra Gemitzi. "Assimilating Soil Moisture Information to Improve the Performance of SWAT Hydrological Model." Hydrology 10.8 (2023): 176.
11. Mariani, P. P., dos Reis Castro, N. M., Sari, V., Schmitt, T. C., & Pedrollo, O. C. (2024). Different infiltration methods for swat model seasonal calibration of flow and sediment production. *Water Resources Management*, *38*(1), 303-322.
12. Mei, Xiaohan, Patricia K. Smith, and Jing Li. "Comparative evaluation of daily streamflow prediction by ANN and SWAT models in two karst watersheds in central south Texas." Hydrology Research (2023): nh2023229.
13. Misaghi, F., Nasrabadi, M., & Nouri, M. (2020). Application of SWAT Model to Simulate Nitrate and Phosphate Leaching from Agricultural Lands to Rivers. *Advances in Environmental Technology*, *6*(1), 1-17.
14. Muhindo, Fatuma. "Improving irrigation water use and management in large paddy rice field using swat model." (2023).
15. Osmani, H., Motamedvaziri, B., & Moeni, A. (2013). Simulation of discharge, calibration and validation of SWAT model, case study: Tehran Latyan dam upstream. *Watershed Engineering and Management*, *5*(2), 134-143.
16. Scott-Shaw, B. C., Lechmere-Oertel, R., & Hill, T. R. (2022). Calibration, validation and application of the SWAT model to determine the hydrological benefit of wetland rehabilitation in KwaZulu-Natal, South Africa. *Water SA*, *48*(4), 348-358.

SWAT-CUP: Integration of Hydrological Modeling and Uncertainty Analysis

Armin Tabari[1], Maede Ghorbanpour Delivand[2]*

Abstract:

The SWAT-CUP system serves as an integrated framework for calibration, uncertainty analysis, and parameter optimization of the SWAT hydrological model, playing a vital role in water and soil resource management. Through a comprehensive literature review, this article examines the principles, applications, advantages, and limitations of this system. Findings indicate that SWAT-CUP—utilizing algorithms such as SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting) and GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation)—enables precise simulation of hydrological processes (e.g., *runoff, soil erosion, and water quality*) across multiple temporal scales. Case studies confirm that integrating satellite data and advanced techniques like Artificial Neural Networks (ANN) enhances model accuracy. However, challenges such as the complexity of baseflow analysis, the need for high-quality input data, and limitations in simulating urban areas necessitate future developments. Implementing this system is crucial for sustainable watershed management, particularly in the context of climate change and water stress.

Keywords:

SWAT-CUP, Hydrological model calibration, Uncertainty analysis, Parameter optimization, Water resource management, Watershed

[1]. Graduated in Natural Engineering, University of Natural Resources, University of Guilan
[2] *. Graduated in Rangeland Science and Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (Corresponding author: maede.ghorbanpour@gmail.com)