



نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی



فصلنامه علمی دانشگاه گلستان

سال سوم / شماره مسلسل دهم / تابستان ۱۴۰۱ / صفحات: ۸۲-۱۰۴

DOI: 10.30488/CCR.2022.354749.1085

ارزیابی عملکرد مدل SWAT در شبیه‌سازی جریان ورودی به مخزن سد جهت مقابله با تغییرات اقلیمی (مطالعه موردی: حوضه آبریز بالادست سد زاینده‌رود)

محسن سبکتکین^۱، حسین منتصری^{۲*}، سعید اسلامیان^۳، رضا خلیلی^۱

^۱ کارشناس ارشد، مهندسی عمران گرایش مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه یاسوج

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه یاسوج

^۳ استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۵/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۵/۱۸

چکیده

تغییرات آب و هوایی یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های پیش روی بشریت است که علوم مرتبط با طبیعت و محیط‌زیست را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تغییرات در پارامترهای تأثیرگذار در تغییرات اقلیمی سبب شده است تا پاسخ‌های هیدرولوژیک حوضه‌های آبخیز تحت تأثیر قرار گرفته و این پدیده بر روی کمیت و کیفیت منابع آب سطحی همچون دریاچه‌ها، آبگیرها و مخازن سدها تأثیر می‌گذارد. امروزه توسعه و پیشرفت فناوری‌های رایانه‌ای و محاسباتی تأثیر بسزایی در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی داشته است. در سال‌های اخیر مدل‌های مفهومی و فیزیکی بر اساس خصوصیات حوضه‌های آبریز برای سیستم‌های هیدرولوژیکی موردتوجه محققان قرار گرفته است. با توجه به وجود آمدن این‌گونه پیشرفت‌ها، پیچیدگی‌هایی در روند مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی به وجود خواهد آمده است. پیش‌بینی‌های صحیح مدیریتی در زمینه منابع آب با توجه به کمبود ذخایر آبی، از مباحث موردتوجه در نهادهای متولی مدیریت منابع آب است که باید از مدل‌های شبیه‌ساز با دقت بالا به‌منظور برآوردها و برنامه‌ریزی‌های بلندمدت استفاده کرد. با توجه به بحران و کمبود ذخایر آبی در ایران، زیر حوضه آبریز بالادست سد زاینده‌رود به‌عنوان مطالعه موردی در این تحقیق انتخاب شده و فرآیندهای هیدرولوژیکی در زیر حوضه‌های بالادست سد زاینده‌رود شبیه‌سازی شده و جریان ورودی به مخزن سد زاینده‌رود برآورد گردید. بدین منظور از مدل ارزیابی آب‌و‌خاک SWAT به‌منظور شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب و در نهایت برآورد جریان ورودی به مخزن مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس رواناب خروجی از سه زیر حوضه بوئین-دامنه، قلعه شاهرخ-چلگرد و چادگان چشمه شبیه‌سازی شده نتایج قابل قبولی برای شبیه‌سازی در سه زیر حوضه مذکور توسط مدل نشان داده شد و از جمع جبری سه رواناب جریان ورودی برآورد شد که ضرایب خطای یادشده برابر ۰/۸۶ به‌دست آمده است. این نتیجه نمایانگر دقت بالای مدل‌ها در شبیه‌سازی است.

واژه‌های کلیدی: تغییرات اقلیمی، شبیه‌سازی هیدرولوژیکی، شبیه‌سازی بارش-رواناب، مدل SWAT، برآورد جریان ورودی مخزن.

مقدمه

اکوسیستم‌های جهانی از جمله منابع طبیعی و کشاورزی که بشریت به آنها وابسته است در حال تغییر است. گزارش بین دولتی در سال ۲۰۱۸ در مورد تغییرات آب و هوا تخمین زده است که جهان با عواقب فاجعه باری روبرو خواهد شد مگر اینکه انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی (GHG) ظرف ۳۰ سال حذف شود (Mahaffey et al., 2020). با این حال،

اثرات تغییرات آب و هوایی به‌طور فزاینده‌ای در محیط‌زیست قابل مشاهده است (Mohammadi et al., 2021). بلایای طبیعی مانند: طوفان، خشک‌سالی، آتش سوزی و سیل شدیدتر و مکرر شده‌اند.

*نویسنده مسئول: hmontaseri@yu.ac.ir

سال به سال، این انتشار افزایش می‌یابد که علوم مرتبط با طبیعت و محیط‌زیست را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Khalili et al., 2021). امروزه با توجه به رشد جمعیت و افزایش نیازهای اولیه بشر که ازجمله آن‌ها آب به‌عنوان یک نیاز حیاتی محسوب می‌شود، سدها نقش اساسی و مهمی را در تأمین آب موردنیاز او ایفا می‌کند (Khalili et al., 2021). سدها سازه‌هایی هستند که معمولاً به‌منظور تأمین آب، تولید برق و کنترل سیلاب احداث می‌شوند (Luan et al., 2018). مطالعات اولیه در طراحی سدها، مطالعات هیدرولوژی منطقه است. در مطالعات هیدرولوژی جریان ورودی به مخازن سدها که اغلب جریان خروجی حوضه‌های آبریز است موردبررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد (Wu et al., 2019). با توجه به شرایط اقلیمی متفاوت و غیر قابل پیش‌بینی، جریان ورودی به مخازن در شرایط خشک‌سالی و ترسالی متفاوت است (Saade et al., 2021). تأثیرات تغییر اقلیم به صورت تغییر مقدار رواناب سطحی و آبهای زیرزمینی نمود پیدا می‌کند. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که متوسط تغییرات رواناب بر اثر پدیده تغییر اقلیم، بیشتر از تغییرات بارش است و این نسبت در مناطق خشک بیشتر از مناطق دارای آب و هوای مرطوب است همچنین در مناطق خشک، نسبت رواناب سالانه به بارش سالانه کمتر از مناطق تر خواهد بود (Khalili et al., 2021). این امر سبب می‌شود مدل‌های شبیه‌ساز به کار گرفته شود تا بتواند حتی‌الامکان تأثیر شرایط متعدد آب و هوایی بر جریان ورودی مخازن را شبیه‌سازی کنند. ازجمله مدل‌های کارآمد در این زمینه، مدل‌های هیدرولوژیکی بوده که با شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی ازجمله فرآیند بارش-رواناب، جریان ورودی به مخازن را شبیه‌سازی می‌کنند (Hallouz et al., 2018). علم هیدرولوژی به‌طورمعمول به روند پیدایش آب و چرخه آن در طبیعت و همچنین به تغییرات به وجود آمده تحت تأثیر عوامل اقلیمی و انسانی می‌پردازد (Myers et al., 2021). مدل‌های بسیاری به‌منظور شبیه‌سازی چرخه آب در طبیعت توسعه یافته‌اند که در قالب مدل‌سازی‌های

هیدرولوژیکی تعریف می‌گردند. توسعه و پیشرفت فناوری‌های رایانه‌ای تأثیر کارآمدی در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی داشته است (Aawar and Khare, 2020). مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی تا کنون به دودسته متفاوت جعبه سیاه و جعبه سفید توسعه داده شده‌اند که در مدل‌های دسته اول، بدون توجه به فرآیندهای داخل سامانه، تنها به ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی سیستم پرداخته می‌شود (Himanshu et al., 2019). در حالی که در دسته دوم فراتر از این ارتباط، به فیزیک و فرآیندهای داخل سیستم و همچنین تغییرات پارامترها به صورت زمانی و مکانی پرداخته می‌شود (Li and Fang, 2021).

در دو دهه اخیر مواردی نظیر دسترسی به داده‌های توزیعی مشاهداتی جهت توسعه مدل‌های داده محور و توسعه مدل‌های مفهومی بر اساس خصوصیات حوضه‌های آبریز برای سیستم‌های هیدرولوژیکی موردتوجه و بحث قرار گرفته است (Li, Di and Duan, 2021). با به وجود آمدن این گونه پیشرفت‌ها، سطح بالایی از پیچیدگی‌ها در روند مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی به وجود خواهد آمد. به‌عنوان مثال توسعه مدل‌های متمرکز به مدل‌های نیمه توزیعی و یا توزیعی ازجمله مواردی است که پیچیدگی مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی را افزایش می‌دهد (Khalili et al., 2021).

ویلاسن^۱ و همکاران به‌وسیله مدل هیدرولوژیکی SWAT جریان سطحی هیدرولوژیکی حوضه آبریز Xedone با مساحت ۷۲۲۴/۶۱ کیلومترمربع واقع در جنوب لاووس را شبیه‌سازی کردند و عملکرد مدل برای دو دوره زمانی سال ۲۰۰۰-۱۹۹۳ و ۲۰۰۸-۲۰۰۱ توسط الگوریتم SUFI2 مدل SWATCUP کالیبره شد و نتایج ضریب همبستگی R^2 برای شبیه‌سازی‌های روزانه و ماهانه به ترتیب برابر ۰/۷ و ۰/۸ را نشان داد (Vilaysane et al., 2015).

تی بیه و همکاران با توجه به بحران کمبود آب حوضه رودخانه هولتا و متغیر بودن شرایط هیدرولوژیکی فصلی آن، مدل SWAT را جهت ارزیابی

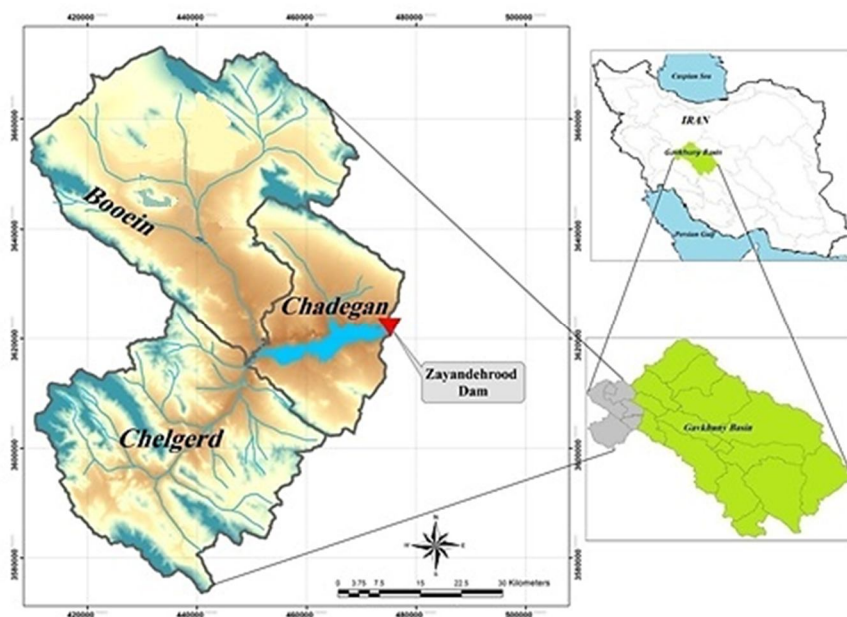
جریان ورودی به مخزن جهت مقابله با تغییرات اقلیمی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: زیر حوضه‌های مذکور مجموعاً با مساحت تقریبی ۴۱۳۳ کیلومترمربع بخش عمده بارش حوضه آبریز زاینده‌رود را در بر می‌گیرند. این محدوده سرزمینی عمدتاً کوهستانی و مرتفع است که قسمتی از سلسله کوه‌های زاگرس و دامنه‌های آن را در بر می‌گیرد. منشأ عمده بارندگی‌های حوضه زاینده‌رود جریان‌های کم‌فشار باران‌زای غربی بوده که از سمت مدیترانه (۶۴/۵ درصد) و اطلس شمالی و دریای سیاه (۱۲/۶ درصد) به منطقه می‌رسند. حوضه موردنظر سه زیر حوضه آبریز بوبین-دامنه، چادگان-چشمه و قلعه شاهرخ-چلگرد را شامل می‌شود. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی سه زیر حوضه مورد نظر را نشان می‌دهد.

هیدرولوژیکی منطقه جهت بررسی منابع آب مورد بررسی قرار دادند و با توجه به توسعه مدل و واسنجی آن، مدل شبیه‌ساز با دقت بالایی به دست آمده که معیارهای ارزیابی خطای NSE و R^2 آن به ترتیب برابر ۰/۸۴ و ۰/۸۵ است (Mahtsente, Assefa and Dereje, 2017).

مهرپرور و همکاران با استفاده از تکنیک داده‌گواری عملکرد مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب خروجی از زیر حوضه آبریز قلعه شاهرخ-چلگرد را بهبود بخشیدند. بر اساس نتایج تکنیک داده‌گواری دقت شبیه‌سازی را ارتقاء داده بطوری که در شبیه‌سازی دبی اوج نتایج اصلاح یافته است. شایان به ذکر است نتایج از بازه سال ۱۹۹۵ الی ۱۹۹۸ مربوط به دوره واسنجی و از سال ۱۹۹۹ الی ۲۰۱۱ مربوط به دوره صحت‌سنجی مدل است (Mehrparvar et al., 2019). در این پژوهش مدل شبیه‌ساز تحت عنوان مدل ارزیابی آب‌و خاک SWAT به منظور شبیه‌سازی



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی زیر حوضه‌های آبریز چلگرد، چادگان و دامنه

سطحی ورودی به مخزن سد زاینده‌رود را شامل می‌شود. در ادامه به توصیف زیر حوضه‌های مذکور پرداخته می‌شود.

با توجه به اهمیت موضوع مطالعاتی، زیر حوضه آبریز چلگرد، بوبین-دامنه و چادگان-یان چشمه جهت انجام مدل‌سازی انتخاب می‌شود که میزان رواناب خروجی از این زیر حوضه بخش قابل توجهی از جریان

مزیت استفاده از HRU ها در بالا بردن دقت محاسباتی است، زیرا این امکان را به مدل می‌دهد که تفاوت در رواناب، تبخیر و تعرق و نفوذ ناشی از تفاوت در نوع خاک و پوشش زمین را در نظر بگیرد. معادله بیلان آبی در SWAT مطابق رابطه (۱) است که در هر واحد محاسباتی HRU این معادله محاسبه می‌گردد.

(۱)

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

در رابطه فوق، t گام زمانی (برحسب روز)، SW_0 مقدار رطوبت اولیه موجود در خاک، SW_t رطوبت خاک در پایان گام زمانی، E_a مقدار تبخیر و تعرق روزانه، W_{seep} مقدار آب نفوذ کرده به منطقه زیر قشری در پروفیل خاک، Q_{surf} مقدار خروجی خالص رواناب سطحی در هرروز، R_{day} مقدار بارش در هرروز و Q_{gw} مقدار نفوذ به سفره زیرزمینی است. همچنین مقدار رواناب بر اساس روابط ارائه شده توسط اداره حفاظت خاک آمریکا محاسبه می‌گردد (Yuan and Koropecjy-Cox, 2022).

مدل SWAT بارش حوضه (R_{day}) را به دودسته بارش باران و بارش‌های جامد نظیر برف، یخ دانه و تگرگ تقسیم‌بندی می‌کند که بر اساس متوسط دمای روزانه، بعد فیزیکی این بارش‌ها مشخص می‌شوند. چنانچه متوسط دمای روزانه از مقدار شرایط مرزی دما (جهت تولید بارش‌های جامد) کمتر شود، بارش‌ها به صورت برف یا دیگر اشکال طبقه‌بندی می‌شود و آب معادل برف به عنوان پوشش برف در حوضه به حساب می‌آید.

میزان نفوذ در مدل SWAT بر اساس رابطه گرین-امپت^۳ محاسبه می‌شود (Senent-Aparicio et al., 2019). محاسبات نفوذ به روش مذکور همراه با فرضیاتی است که از جمله آن‌ها همگن بودن خاک و اشباع بودن کامل خاک بالای ناحیه تر شدگی است. شکل ۲-۳ فرضیات در نظر گرفته شده جهت محاسبه نفوذ در مقایسه با واقعیت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش رطوبت به صورت غیرخطی

مدل ارزیابی آب و خاک SWAT: مدل‌سازی هیدرولوژیکی در مقیاس حوضه‌های آبریز به دو صورت روند یابی متمرکز و توزیعی انجام می‌گیرد. مدل‌های توزیعی توانایی مدل کردن تمامی تغییرات مکانی را دارند و این امر در مقیاس حوضه‌های بزرگ زمان‌بر است (Mengistu, van Rensburg and Woyessa, 2019). شبیه‌سازی در مدل فیزیکی SWAT به صورت پیوسته و بلندمدت^۱ است. مدل SWAT با کارایی قابل قبولی به منظور شبیه‌سازی رواناب، بررسی اثرات تغییر اقلیم، انتقال آلودگی و رسوب و دیگر زمینه‌های هیدرولوژیکی و مدیریتی به کار گرفته می‌شود. با وجود انبوه مدل‌های فیزیکی توزیعی، محققین مدل نیمه توزیعی SWAT را به عنوان مدل محاسباتی کارآمد با قابلیت اطمینان نسبی خوبی معرفی کردند که امروزه به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرد.

روند شبیه‌سازی در مدل SWAT به دو فاز تقسیم‌بندی می‌شود. فاز اول شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژیکی در اراضی بوده که به کنترل میزان آب، رسوبات، مواد مغذی و آفت‌کش‌ها با در نظر گرفتن رابطه بیلان جرمی آب پرداخته می‌شود. در فاز دوم به روند یابی جریان پرداخته می‌شود که میزان انتقال آب، رسوبات و مواد مغذی در آبراهه‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد.

روند یابی نیمه توزیعی در SWAT بدین صورت است که یک حوضه آبریز به چندین زیر حوضه تقسیم می‌شود و در نرم افزار این زیر حوضه‌ها بانام واحد پاسخ هیدرولوژیکی^۲ (HRU) مطرح می‌شوند. این تقسیم بندی‌ها با توجه به سطح آستانه تشکیل آبراهه مشخص می‌شود. HRU ها کوچک ترین واحد محاسباتی در مدل می‌باشند که اطلاعات کاربری اراضی، خاک و شیب یک منطقه را پوشش می‌دهد و یا به عبارتی هر واحد دارای مشخصات یکسانی از کاربری اراضی، شیب و خاک است (Zhang et al., 2020).

1. Continuous base

2. Hydrologic Response Unit

3. Green and Ampt

طول و شیب آبراهه اصلی و A مساحت زیر حوضه است. روش SCS تحت عنوان روش شماره منحنی شناخته می‌شود که توسط اداره حفاظت خاک آمریکا ارائه شده است. مقدار رواناب مازاد بر اساس کاربری اراضی و جنس خاک متفاوت توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$Q_{surf} = \frac{(R - 0.2S)^2}{R + 0.8S} \quad R > 0.2S \quad (5)$$

$$Q_{surf} = 0 \quad R < 0.2S \quad (6)$$

Q_{surf} عمق رواناب مازاد، R عمق بارش روزانه و S نگهداشت اولیه شامل خیز سطحی، برگاب و میزان نفوذ آب پیش از شروع رواناب است. این پارامتر از نظر مکانی با تغییرات خاک، کاربری اراضی، مدیریت و شیب و از نظر زمانی با تغییرات رطوبت خاک تغییر می‌کند.

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (7)$$

CN شماره منحنی حوضه آبریز است که بین صفر و ۱۰۰ متغیر است و به ویژگی‌های فیزیکی آن وابسته است. شماره منحنی تابعی از نفوذپذیری، کاربری اراضی و شرایط رطوبتی خاک است و مقدار عددی آن با توجه به پوشش زمین و نوع خاک متفاوت خواهد بود. پارامتر تبخیر و تعرق روزانه در مدل‌سازی SWAT توسط سه روش پنمن-مونتیه^۴، هارگریوز و همکاران^۵ و پریستلی-تیلور^۶ محاسبه می‌گردد (Oo, Zin and Kyi, 2020).

چرخه هیدرولوژیکی مدل SWAT با شبیه‌سازی جریان‌های تراوش زیرزمینی از لایه‌های مختلف به یکدیگر تکمیل می‌گردد. بر اساس اطلاعات و داده‌های پروفیل خاک فرآیند شبیه‌سازی جریان‌های زیرزمینی و زیرسطحی برای مدل امکان‌پذیر بوده که داده‌های پروفیل خاک شامل اطلاعاتی از جمله تعداد لایه‌های خاک، ضخامت آن‌ها، جنس خاک و هدایت هیدرولیکی خاک است (Wang et al., 2019).

بوده، در صورتی که در این روش به صورت یکنواخت فرض شده و ناحیه بندی خاک در واقعیت به ۳ ناحیه تر شدگی^۱، انتقال^۲ و اشباع^۳ تقسیم می‌شود. در رابطه گرین-امپت، پروفیل خاک به صورت همگن در نظر گرفته شده و فرض می‌شود که رطوبت به طور یکنواخت در خاک پخش می‌گردد. هنگامی که آب به خاک نفوذ می‌کند، مدل فرض می‌کند که خاک بالای جبهه رطوبتی کاملاً اشباع است و یک شکست تیز در میزان رطوبت خاک در جبهه رطوبتی وجود دارد. شدت نفوذ در رابطه گرین-امپت عبارت است از:

(۲)

$$f_{inf,t} = K_e \left(1 + \frac{\psi_{wf} \Delta \theta_v}{F_{inf,t}} \right)$$

$f_{inf,t}$ نشان‌دهنده شدت نفوذ در زمان t ، K_e ضریب هدایت هیدرولیکی مؤثر، ψ_{wf} پتانسیل جبهه رطوبتی، $\Delta \theta_v$ تغییرات حجمی رطوبت خاک در جبهه رطوبتی و $F_{inf,t}$ نفوذ تجمعی در زمان t می‌باشند.

زمان تمرکز حوضه نیز در مدل SWAT بر مبنای مجموع زمان تمرکز جریان‌های بر روی اراضی (t_{ov}) و زمان تمرکز جریان در آبراهه‌ها (t_{ch}) محاسبه می‌شود که نحوه محاسبه در آبراهه‌ها بر اساس نسبت مسافت طی شده به سرعت جریان است. سرعت جریان نیز برگرفته از رابطه مانینگ تخمین زده می‌شود. زمان تمرکز جریان بر روی اراضی نیز به وسیله روابط اداره حفاظت خاک آمریکا (SCS) محاسبه می‌گردد (Pang et al., 2020).

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}^{0.6} n^{0.6}}{18 slp^{0.3}} \quad (3)$$

$$t_{ch} = \frac{0.62 L n^{0.75}}{A^{0.125} slp_{ch}^{0.375}} \quad (4)$$

در روابط فوق L_{slp} طول شیب اراضی زیر حوضه، slp شیب زیر حوضه، n ضریب مانینگ، L و slp_{ch} به ترتیب

4. Penman-Monteith
5. Hargreaves et al.
6. Priestley- Taylor

1. Wetting zone
2. Transmission zone
3. Saturated zone

شایان ذکر است که مقیاس زمانی و مکانی بر اساس انتخاب بهینه ایستگاه‌ها از نظر تعداد، موقعیت و دقت آن‌ها انتخاب می‌شود. بطوری که تعداد ایستگاه‌های هواشناسی و موقعیت آن‌ها در متغیر بودن نتایج تأثیرگذار خواهد بود.

حجم زیاد بانک اطلاعاتی موردنیاز از نقاط ضعف این مدل بوده که لازم است داده‌های مربوط به پروفیل سطح خاک، داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی با دقت بالا در دسترس باشد. برای نمونه، اطلاعات موردنیاز پروفیل خاک نیاز به آزمایش‌های مکانیک خاک با هزینه‌های بالا است که در بسیاری از حوضه‌ها آسان نخواهد بود. از طرفی پارامترهای مدل برای واسنجی نسبت به مدل‌های مشابه بیشتر بوده که روند شبیه‌سازی را پیچیده خواهد کرد.

مدل SWAT تحت محیط نرم‌افزار ArcMap اجرا شده و GIS-base است (Bouslihim et al., 2019). لازمه شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوضه‌های آبریز به‌وسیله مدل SWAT، دسته‌ای از داده‌ها و اطلاعات هیدرولوژیکی شامل داده‌های هواشناسی از جمله بارش، دما، رطوبت، باد و تابش به صورت روزانه است که علاوه بر آن پارامترهای فیزیکی و فیزیوگرافی حوضه در قالب نقشه‌های توپوگرافی، کاربری اراضی و پروفیل خاک جهت شبیه‌سازی مورد نیاز است. داده‌های هواشناسی در قالب کوچک‌ترین بعد زمانی به صورت روزانه به مدل وارد می‌شود. ولیکن خروجی مدل (رواناب) بر اساس داده‌های مشاهداتی به صورت روزانه، ماهانه و سالانه قابل استخراج است. جزییات اطلاعات خاک و هواشناسی به شرح جدول ۱ است.

جدول ۱- شرح داده‌های موردنیاز هواشناسی و خاک مدل SWAT

داده‌های پروفیل و جنس خاک					
نوع داده	گروه هیدرولوژیکی	ضخامت لایه‌ها	تعداد لایه‌های خاک	جنس لایه‌های خاک	
داده‌های هواشناسی					
نوع داده	بارش	دما	رطوبت خاک	تابش خورشید	باد
بعد مکان-زمان	روزانه/ایستگاه				

خودکار به دست نیاید. ون لئو^۲ و همکاران (Van Liew, Arnold and Bosch, 2005) تلفیقی از دو حالت خودکار و دستی را به‌منظور واسنجی مدل پیشنهاد دادند که الگوریتم SUFI2^۳ توسط عباس‌پور و همکاران جهت رسیدن به این هدف مناسب است. ۱- این روش نیاز به معرفی یک تابع هدف دارد که میزان ارتقاء عملکرد مدل در شبیه‌سازی متعدد و پی در پی را نشان دهند و معیار Nash-Sutcliffe جهت ارزیابی صحت برازش هر یک از این توابع بکار می‌رود.

۲- در این مرحله باید مقادیر بیشینه و کمینه مطلق پارامترها تعریف شود. از آنجاکه این پارامترها نقش مهمی در دقت شبیه‌سازی مدل دارند باید

واسنجی مدل: واسنجی مدل‌ها اغلب به دو صورت خودکار و دستی انجام می‌گیرد که در حالت خودکار در قالب یک مدل بهینه‌سازی تمامی پارامترها به‌عنوان متغیر در نظر گرفته می‌شوند، روند بهینه‌سازی بدون توجه به فیزیک و مفهوم مسئله و تطابق آن با واقعیت انجام شده که بهترین مقادیر برای پارامترها انتخاب می‌شود (Dhami et al., 2018). تابع هدف در این بهینه‌سازی حداقل کردن اختلاف بین مشاهدات و مقادیر شبیه‌سازی است که برای نمونه می‌توان به الگوریتم SCE-UA^۱ اشاره کرد. در حالت واسنجی دستی به مفهوم و فیزیک مسئله مطابق با توضیحات فوق توجه بیشتری می‌شود ولی این امکان وجود دارد که نتایج از لحاظ کمیت مطابق با حالت

2. Van Liew

4. Sequential Uncertainty Fiting version 2

1. Shuffled Complex Evolution algoritm

قطعی پارامترها کاهش یافته و به سمت یک مقدار ثابت هدایت شود.

$$b'_{j,\min} = b_{j,\text{best}} - \max\left(\frac{b_{j,\text{best}} - b_{j,\min}}{2}, \frac{b_{j,\max} - b_{j,\text{best}}}{2}\right) \quad (9)$$

$$b'_{j,\max} = b_{j,\text{best}} + \max\left(\frac{b_{j,\text{best}} - b_{j,\min}}{2}, \frac{b_{j,\max} - b_{j,\text{best}}}{2}\right) \quad (10)$$

جهت ارزیابی واسنجی در هر مرحله می‌توان از معیارهای ارزیابی خطا که توسط نرم‌افزار SWATCUP صورت می‌گیرد استفاده کرد. از جمله آن‌ها می‌توان به ضریب NS و ضریب همبستگی R^2 اشاره کرد. این ضرایب میزان همبستگی و تطابق داده‌های شبیه‌سازی با مشاهداتی را نشان خواهد داد. مقادیر بالای ضرایب مذکور نشان از بهبود مدل و کاهش خطا در شبیه‌سازی است. ضریب NS توسط رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود (Shi and Huang, 2021).

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \quad (11)$$

در رابطه فوق، Q متغیر موردنظر (دبی جریان)، m نمای داده‌های واقعی یا مشاهداتی، s نمای داده‌های شبیه‌سازی شده است. به‌طورمعمول برای مقادیر NS بالاتر از ۰/۶ عملکرد مدل مناسب ارزیابی می‌شود.

بحث

جمع‌آوری داده‌ها: توزیع مکانی ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در منطقه مورد مطالعه با توجه به نهادهای ارائه دهنده داده‌ها، متنوع است. جدول ۲ تعداد و نوع ایستگاه‌های تحت پوشش منطقه مورد مطالعه را مشخص می‌کند که ایستگاه‌های همدید تحت پوشش سازمان هواشناسی بوده و سایر ایستگاه‌ها تحت پوشش سازمان هواشناسی و سازمان آب منطقه‌ای (وزارت نیرو) است. لازم به توضیح است که دوره زمانی بیست ساله انتخاب‌شده جهت شبیه‌سازی و ارزیابی محدود به بازه زمانی سال ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۶ (۱۹۹۷ تا ۲۰۱۷ میلادی) است.

تا حد امکان دامنه انتخاب‌شده بزرگ و از نظر فیزیکی معنادار باشد. به‌عنوان مثال پارامتر b_j بین دو حد حداقل $b_{j,\min}$ و حداکثر $b_{j,\max}$ قرار گیرد.

$$b_{j,\min} \leq b_j \leq b_{j,\max} \quad j = 1, \dots, m \quad (8)$$

۳- با مشخص شدن بازه‌های پارامترها، مقادیر تصادفی بین این بازه‌ها توسط الگوریتم LHS تولید می‌شود که با فرض یکنواخت بودن توزیع آماری پارامترها برای کلیه پارامترها این امر انجام خواهد گرفت.

۴- داده‌های ایستگاه‌های مشاهداتی و داده‌های خروجی شبیه‌سازی شده مدل SWAT برای یک دوره زمانی مشخص آماده می‌شود و به نرم‌افزار داده می‌شود که معمولاً از داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری و تبخیرسنجی به‌عنوان داده‌های مشاهداتی استفاده می‌شود (Jeon et al., 2019).

۵- اجرای الگوریتم SUFI2 برای تعیین تعداد تکرارها با توجه به تعداد داده‌های تولید شده توسط الگوریتم LHS برای پارامترها انجام می‌شود. نتایج ارائه‌شده توسط الگوریتم شامل نمودار پوشش 95PPU، پارامترهای آنالیز حساسیت و مقادیر تابع هدف است. مقادیر تابع هدف در هر مرحله الگوریتم بر اساس تابع تعریف شده، میزان بهبود نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال چنانچه تابع Nash-Sutcliffe (NS) انتخاب شود، در مراحل واسنجی و یا به عبارتی اجرای الگوریتم، مقادیر تابع محاسبه شده و با افزایش نتایج، اصلاح پارامترها نمایان خواهد شد. پارامترهای آنالیز حساسیت شامل ۲ پارامتر t-statistic و p-value می‌باشند که هر چه مقدار پارامتر t-statistic از صفر فاصله بگیرد و یا پارامتر p-value مقدار کمتری به خود اختصاص دهد، پارامتر موردنظر در روند واسنجی از حساسیت بیشتری برخوردار است (Akoko et al., 2021).

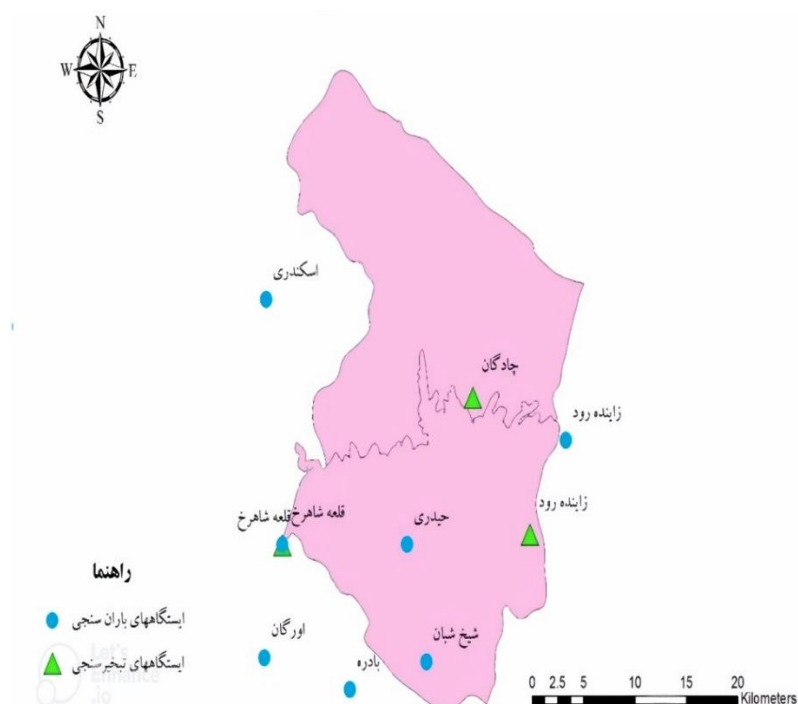
۶- پس از رتبه‌بندی شبیه‌سازی‌های انجام‌شده بر اساس تابع هدف، پارامترهای بهترین شبیه‌سازی مشخص شده و متناظر با پارامتر $b_{j,\text{best}}$ نام گذاری می‌شود. بدین ترتیب می‌توان دامنه جدید بالا و پایین را برای پارامتر j با کمک روابط (۹) و (۱۰) به دست آورد و مراحل ۲ تا ۶ تکرار شود تا محدوده عدم

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه

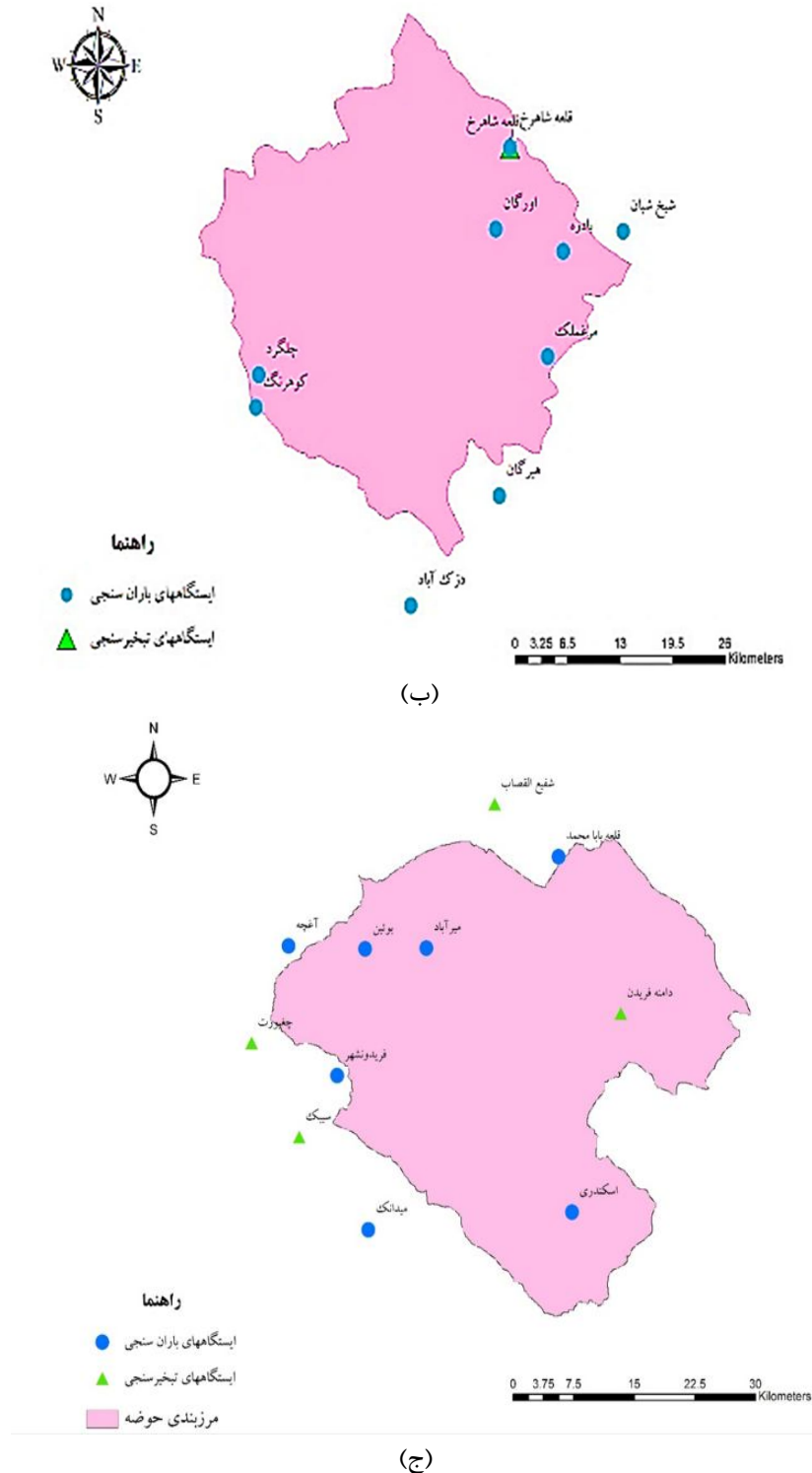
ایستگاه‌های باران‌سنجی		ایستگاه‌های تبخیرسنجی		ایستگاه‌های همدید		ایستگاه‌های هیدرومتریک		زیر حوضه مورد مطالعه
تعداد	پوشش بازه زمانی	تعداد	پوشش بازه زمانی	تعداد	پوشش بازه زمانی	تعداد	پوشش بازه زمانی	
۷	۵۷٪	۶	۶۷٪	۲	۱۰۰٪	۱	۱۰۰٪	بویین-دامنه
۳	۱۰۰٪	۲	۱۰۰٪	۰	۰	۲	۱۰۰٪	چادگان-پان چشمه
۹	۷۸٪	۲	۱۰۰٪	۱	۱۰۰٪	۱	۱۰۰٪	قلعه شاهرخ-چلگرد

داده‌های هواشناسی: شکل‌های ۲ موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی زیر حوضه‌ها را نشان می‌دهد. مدل SWAT از سه روش جهت شبیه‌سازی تبخیر در سطح حوضه‌های آبریز استفاده می‌کند. از آنجاکه پراکندگی داده‌های رطوبت نسبی، تابش خورشید و باد در زیر حوضه‌ها مناسب نبوده، از روش هارگریوز که تنها به داده‌های دما جهت

شبیه‌سازی تبخیر نیاز دارد استفاده شد. مدل SWAT جهت بازسازی و تولید داده‌های هواشناسی نامعلوم در طول دوره آماری از اطلاعات آماری یک ایستگاه هواشناسی مبدأ استفاده می‌کند که معمولاً از اطلاعات آماری ایستگاه‌های همدید منطقه جهت تولید داده استفاده می‌شود.



(الف)



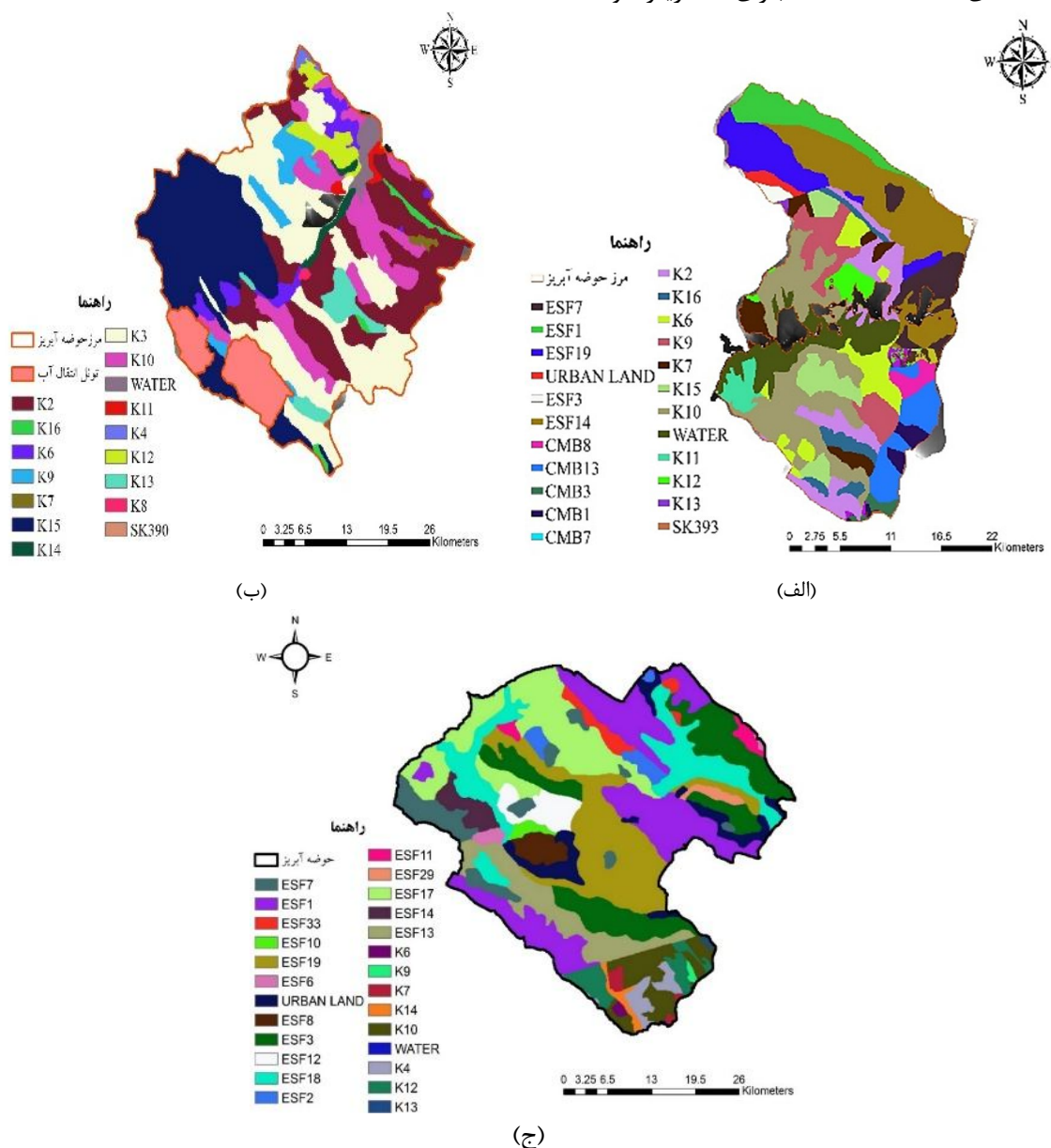
شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های باران سنجی و تیدرسنجی زیر حوضه آبریز چادگان-یان چشمه (الف)، زیر حوضه آبریز قلعه شاهرخ-چلگرد (ب)، زیر حوضه آبریز دامنه-بوئين (ج)

اطلاعات مربوط به پروفیل خاک، جنس لایه‌های خاک و ضخامت آن‌ها، گروه هیدرولوژیکی و ضریب نفوذپذیری لایه‌ها مشخص باشد. بدین منظور برای سه

پروفیل و جنس خاک: در این مطالعه شبیه‌سازی رواناب در زیر حوضه‌های آبریز در مدل SWAT با استفاده از روش SCS انجام می‌گیرد که بایستی

موردنظر در شکل‌های ۳ نشان داده شده‌اند. در نقشه‌های نشان داده شده، زیر حوضه‌ها به نواحی متعددی تقسیم شده که هر ناحیه دارای مشخصات متفاوت است. هر ناحیه با یک شماره که در راهنمای نقشه نشان داده شده است با جدول اطلاعات مشخصات خاک مرتبط می‌شود.

زیر حوضه نقشه‌های GIS آماده شده که تمامی نواحی تقسیم بندی شده با یک شماره با جدول اطلاعات آن شماره که نشان دهنده مشخصات ذکر شده است در ارتباط بوده و بدین ترتیب لایه‌ای از نقشه‌های خاک به همراه اطلاعات آن بر روی نقشه‌های دیگر نظیر کاربری اراضی و توپوگرافی همپوشانی می‌شود. نقشه‌های خاک آماده شده برای سه زیر حوضه



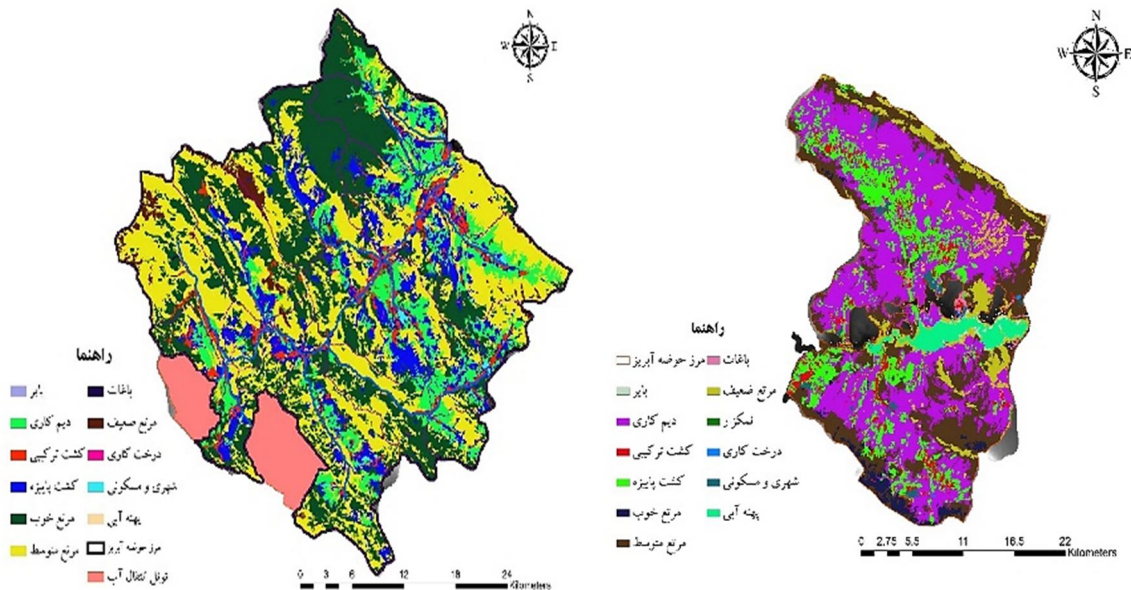
شکل ۳- نقشه پروفیل خاک زیر حوضه آبریز چادگان-یان چشمه (الف)، زیر حوضه آبریز قلعه شاهرخ-چلگرد (ب)، زیر حوضه آبریز دامنه-بوئین (ج)

متناسب با پارامتر شماره منحنی است که این پارامتر بر اساس میزان نفوذ آب در خاک و کاربری اراضی

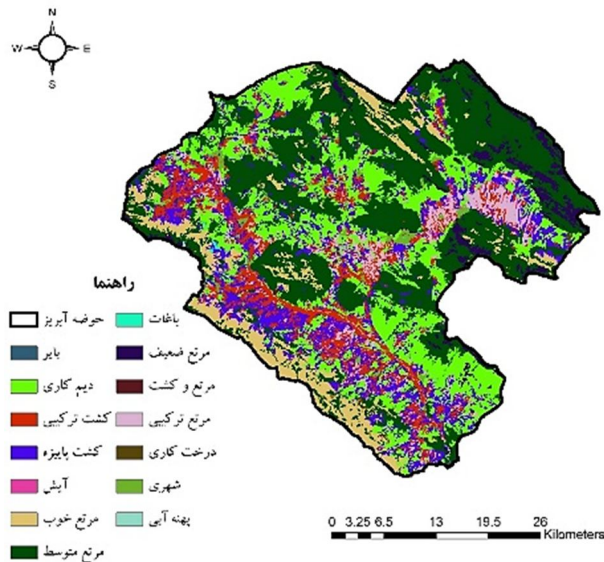
کاربری اراضی: میزان نگهداشت آب بر روی اراضی به عنوان آبی که به صورت رواناب جاری نشده باشد

محصول (HVSTI)، شاخص‌های رشد گیاه با دریافت انرژی خورشید (BIO_E, WAVP, CO₂HI, BIOEHI) و غیره، مرتبط با هر نوع پوشش مشخص شده است. شکل‌های 4 نشان‌دهنده نقشه‌های کاربری اراضی زیر حوضه‌های مطالعاتی می‌باشند.

حوضه مشخص می‌شود. بدین جهت نقشه‌های کاربری اراضی نیز همانند نقشه‌های خاک بر اساس کاربری‌های هر زیر حوضه ناحیه بندی شده و هر ناحیه توسط یک مقدار مشخص با جدول اطلاعات آن در ارتباط است که در این جدول مقادیر پارامترهایی نظیر شاخص سطح برگ (BLAI)، شاخص برداشت



(الف)

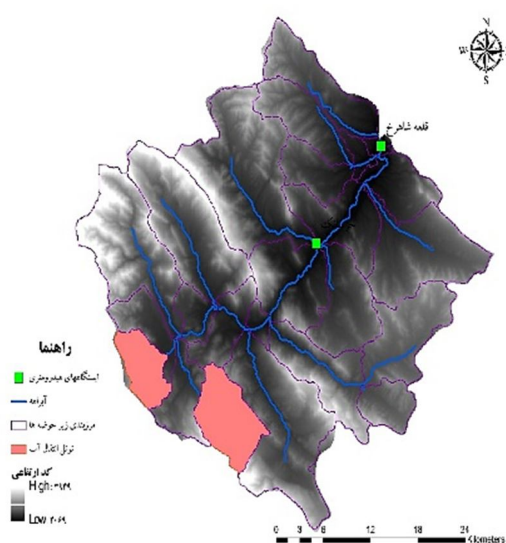


(ج)

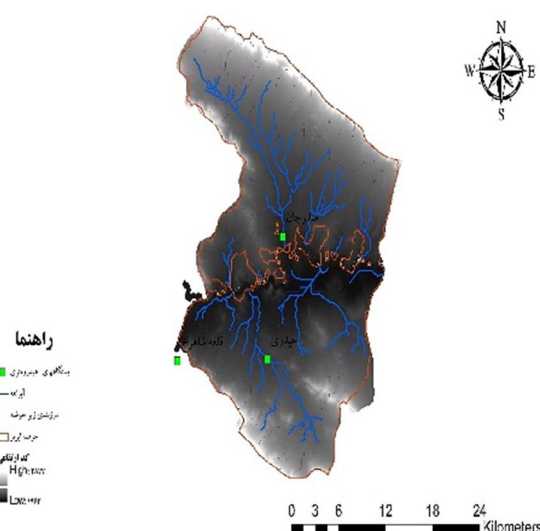
شکل ۴- نقشه کاربری اراضی زیر حوضه آبریز چادگان-یان چشمه (الف)، زیر حوضه آبریز قلعه شاهرخ-چلگرد (ب)، زیر حوضه آبریز دامنه-بوئین (ج)

توپوگرافی و شیب حوضه: شیب حوضه و مسیر آبراهه‌ها بر اساس نقشه‌های توپوگرافی حوضه‌ها مشخص می‌شود. نقشه‌های DEM زیر حوضه‌های مذکور برای این منظور تهیه شده که این نقشه‌ها به فرم فایل‌های رستری GIS-base بوده که بر روی نقشه‌های خاک و کاربری اراضی همپوشانی می‌شود. این نقشه‌ها کدهای ارتفاعی زیر حوضه‌ها را در هر نقطه نشان می‌دهد. اولین گام در محیط GIS-base

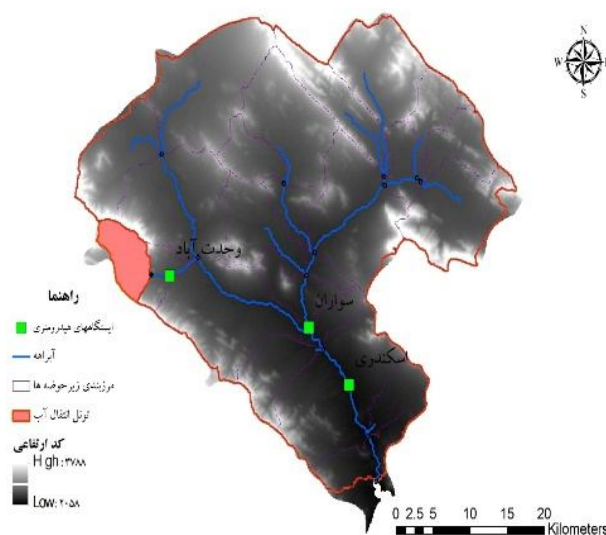
مدل SWAT وارد کردن نقشه‌های DEM است که مسیر آبراهه‌ها با توجه به آن‌ها مشخص می‌شود و مرزهای حوضه آبریز با توجه به نقشه‌های DEM بسته می‌شود. شکل‌های - نقشه‌های زیر حوضه‌های آبریز به همراه مسیرهای آبراهه‌ها را نشان می‌دهد. همچنین موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری در زیر حوضه‌ها قابل رؤیت است که از این ایستگاه‌ها جهت واسنجی مدل استفاده می‌شود.



(ب)



(الف)

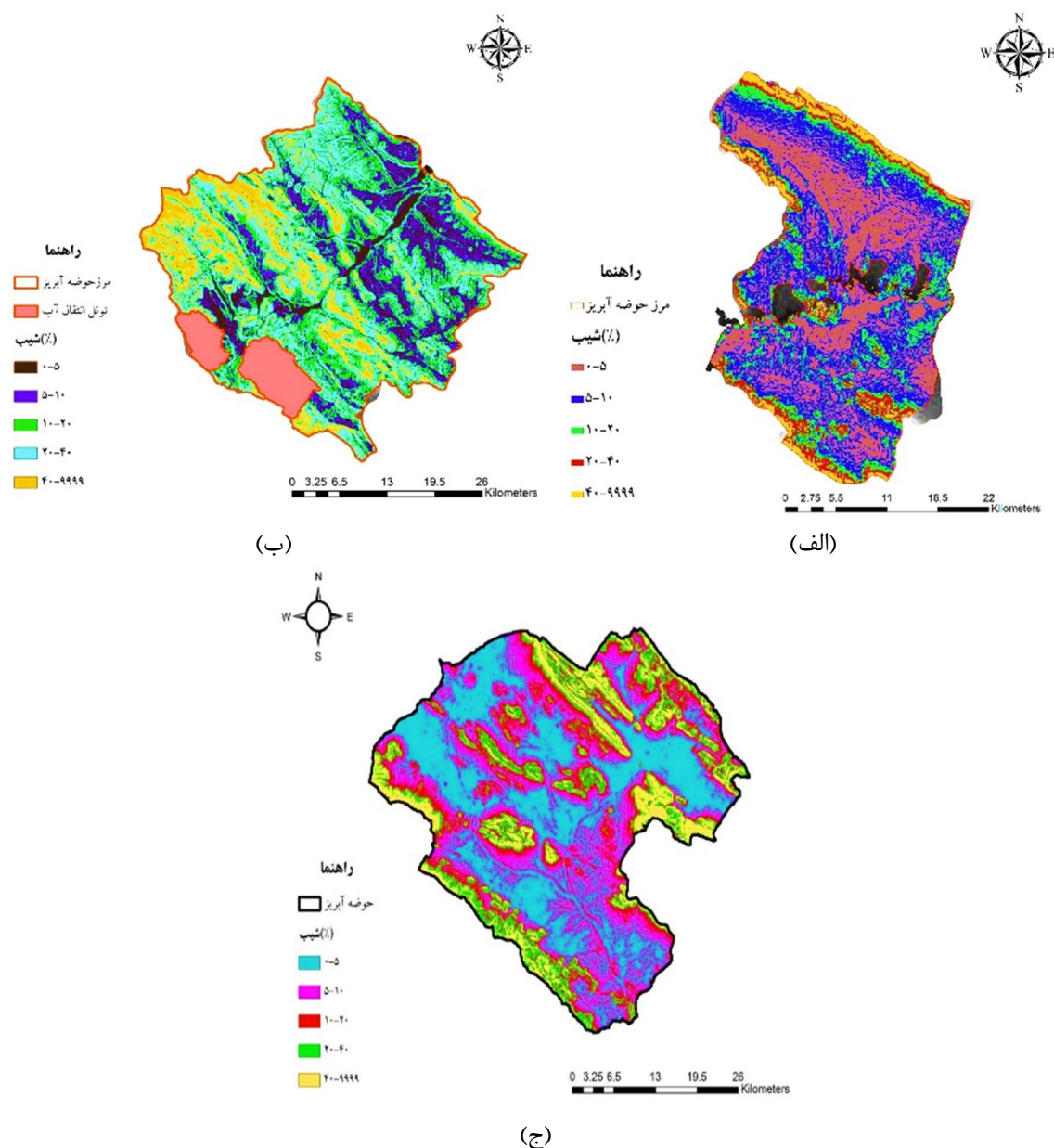


(ج)

شکل ۵- نقشه DEM زیر حوضه آبریز چادگان-یان چشمه (الف)، زیر حوضه آبریز قلعه شاهرخ-چلگرد (ب)، زیر حوضه آبریز دامنه-بوئین (ج)

قابلیت برای مدل وجود دارد که کلیه کاربری‌های اراضی و پروفیل‌های خاک در نظر گرفته شود که این امر سبب افزایش تعداد HRU ها و بالا رفتن زمان محاسبات می‌گردد. نقشه شیب بندی ۳ زیر حوضه بر اساس ۵ کلاسه که تعداد آن‌ها توسط کاربر مشخص می‌شود به وسیله مدل SWAT تهیه می‌شود. نقشه‌ها مطابق شکل-می‌باشند که محل تشکیل آبراهه‌ها در بازه شیب صفر تا پنج درصد تشکیل می‌گردد.

تحلیل واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU): در این مرحله واحدهای HRU مشخص می‌شود که هر واحد نشانگر همپوشانی سه نقشه کاربری اراضی، پروفیل خاک و طبقه‌بندی شیب است. واحدهای HRU عموماً بر اساس تقسیم‌بندی‌های زیر حوضه‌ای که توسط مدل صورت گرفته انجام گرفته که در هر واحد کاربری اراضی، پروفیل خاک و شیب بندی غالب در نظر گرفته می‌شود. البته بایستی اشاره شود که این



شکل ۶- نقشه شیب بندی در محیط GIS محور SWAT، زیر حوضه آبریز چادگان-یان چشمه (الف)، زیر حوضه آبریز قلعه شاهرخ-چلگرد (ب)، زیر حوضه آبریز دامنه-بوئین (ج)

واسنجی و صحت‌سنجی: با استفاده از الگوریتم SUFI2 مدل SWATCUP، در ابتدا بایستی با انجام آنالیز حساسیت، پارامترهای حساس مدل را استخراج کرد. با استفاده از الگوریتم SUFI2 در گام اول به آنالیز حساسیت پارامترهای جریان سطحی و برف پرداخته شده و پارامترهای حساس انتخاب‌شده و در گام بعدی با انتخاب پارامترهای حساس از مرحله قبل و پارامترهای جریان زیرسطحی روند کار ادامه می‌یابد. پس از انجام این روند، لیست پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی بارش-رواناب برای محدوده مطالعاتی انتخاب‌شده مطابق جدول ۴-۷ برای واسنجی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از قابلیت‌های الگوریتم یاد شده، در نظر گرفتن تغییرات کلیه پارامترها به صورت همزمان در بازه‌های تعریف شده است که این بازه‌ها مطابق با مقادیر اولیه پیشنهادی توسط مدل SWAT در نظر گرفته می‌شوند. نتایج آنالیز حساسیت با

الگوریتم مذکور مطابق جدول ۳ است و شش پارامتر به عنوان حساس‌ترین پارامترها شناخته می‌شوند، این پارامترها شامل شماره منحنی SCS در شرایط رطوبتی متوسط (CN_2)، ضریب اتلاف از آبراهه اصلی به سفره‌ها (TRNSRCH)، حداقل ارتفاع آب معادل برف (SNOCVMX)، دمای تفکیک برف و باران (SFTMP)، ضریب انتقال از سفره کم عمق به عمیق (RCHRG_DP) و ظرفیت آب قابل دسترس در لایه خاک (SOL_AWC) هستند. به عنوان مثال TRNSRCH با مقدار $-12/1$ و $t\text{-statistic} = -12/1$ و $p\text{-value} = 0/00$ حساس‌ترین پارامتر در مدل‌سازی حوضه آبریز بوئین-دامنه است. لازم به ذکر است که هر چه مقادیر $t\text{-statistic}$ از صفر فاصله گیرد و یا مقادیر $p\text{-value}$ کمتر باشد، نشان‌دهنده حساسیت پارامتر موردنظر نسبت به تغییرات است.

جدول ۳- نتایج آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای انتخابی مدل SWAT

ت-Stat	P-Value	رتبه	نام پارامتر	زیر حوضه آبریز
۲,۵۹	۰,۰۱	۴	SOL_AWC	چادگان-چشمه
۵,۷۰	۰,۰۰	۳	SFTMP	
۷,۷۷	۰,۰۰	۲	SNOCVMX	
۲۳,۳۳	۰,۰۰	۱	CN_2	
-۱,۸۸	۰,۰۶	۴	RCHRG_DP	دامنه-بوئین
۳,۰۳	۰,۰۰	۳	SNOCVMX	
۸,۴۵	۰,۰۰	۲	CN_2	
-۱۲,۱	۰,۰۰	۱	TRNSRCH	
۰,۷۶	۰,۴۴	۴	SFTMP	قلعه شاهرخ-چلگرد
-۰,۹۴	۰,۳۵	۳	RCHRG_DP	
-۱,۶۱	۰,۰۰	۲	TRNSRCH	
-۴,۳۷	۰,۰۰	۱	CN_2	

پس از مشخص شدن پارامترهای حساس مدل، در تکرارهای متوالی الگوریتم SUFI2 اجرا شده که در هر تکرار بازه تغییرات پارامترها کوچکتر شده تا به یک مقدار معین ثابت شود. در هر تکرار معیار ارزیابی Nash Sutcliffe (NS) توسط الگوریتم محاسبه شده و چنانچه تغییرات آن رو به افزایش باشد، نمایانگر بهبود

یافتن عملکرد مدل و یافتن مقادیر مناسب پارامترهای مدل است. برای بازه زمانی سال ۱۹۹۷ میلادی تا ۲۰۰۹ میلادی، مدل واسنجی شده که پس از تکرارهای متعدد بهترین ضریب نش با کمترین خطا برای مدل‌های زیر حوضه‌ها مطابق جدول ۴ به دست می‌آید.

جدول ۴- ضریب نش مدل‌های توسعه یافته پس از واسنجی

چادگان-یان چشمه		بوئین-دامنه	قلعه شاهرخ-چلگرد	زیر حوضه مطالعاتی
هیدرومتریک حیدری	هیدرومتریک مندرجان	هیدرومتریک- اسکندری	هیدرومتریک- قلعه شاهرخ	ایستگاه شاهد
۰,۲۷	۰,۵۴	۰,۸۱	۰,۹۱	ضریب نش (NS)

می‌شود که دقت شبیه‌سازی در این حوضه بهتر از دیگر حوضه‌ها بوده و بایستی در نظر گرفته شود که در این حوضه با درنظر گرفتن آورد آب توسط تونل‌های اول و دوم کوهرنگ، دبی‌های اوج مصرف قابل توجه است و این حوضه سهم قابل توجه در جریان ورودی به مخزن سد زاینده‌رود دارد.

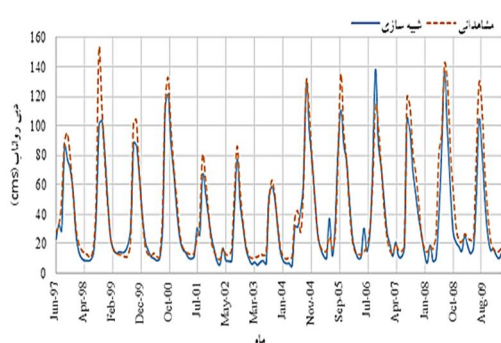
شکل ۷-ج سری زمانی دبی‌های شبیه‌سازی در نزدیکی دو ایستگاه هیدرومتری مندرجان و حیدری را نشان می‌دهد که ایستگاه‌های نام برده به ترتیب در زیر حوضه‌های چادگان و یان چشمه واقع می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود سری زمانی دبی رواناب شبیه‌سازی‌شده در زیر حوضه چادگان مناسب‌تر از زیر حوضه یان چشمه بوده و نتایج تطابق بهتری با داده‌های مشاهداتی دارد. بایستی اشاره شود که بازه زمانی واسنجی با ایستگاه حیدری از سال ۲۰۰۱ میلادی آغاز می‌شود، بدلیل آنکه آمار برداری از ایستگاه از سال ۱۳۷۸ شمسی (۱۹۹۹ میلادی) آغاز شده است.

می‌توان عملکرد مناسب مدل‌ها را با بررسی نمودار پراکندگی داده‌ها ارزیابی کرد. شکل‌های ۸ پراکندگی داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی دبی رواناب را در ایستگاه‌های هیدرومتری نشان می‌دهد که با توجه به نمودارهای پراکندگی، برای ایستگاه‌های اسکندری، قلعه شاهرخ، مندرجان و حیدری به ترتیب ضرایب همبستگی برابر ۰/۸۳، ۰/۹۲، ۰/۶۱ و ۰/۴۷ به دست آمده است که این آمار برای کل بازه زمانی مطالعاتی است.

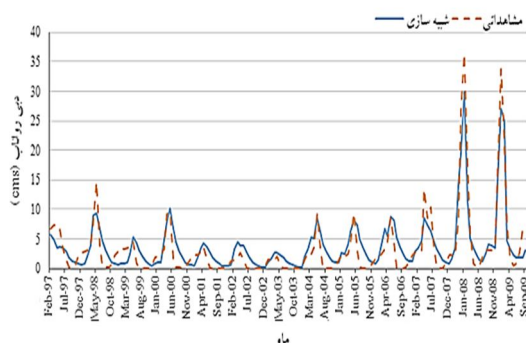
همان‌طور که مشاهده می‌شود بالاترین دقت شبیه‌سازی مربوط به مدل‌سازی حوضه قلعه شاهرخ-چلگرد است و کمترین مقدار آن مربوط به زیر حوضه یان چشمه است که دلیل آن عدم دسترسی به برداشته‌ها و مصارف و همچنین اطلاعات دیگر نظیر منابع نقطه‌ای (چشمه و چاه) است. بر اساس این نتایج، شکل‌های ۷ سری زمانی دبی رواناب شبیه‌سازی‌شده را در مقایسه با داده‌های مشاهداتی که توسط ایستگاه‌های هیدرومتریک اندازه‌گیری شده است نشان می‌دهد.

در شکل ۷-الف که نشان‌دهنده رواناب شبیه‌سازی در نقطه ایستگاه هیدرومتریک اسکندری است، بازه آماری واسنجی از سال ۱۳۷۶ شمسی الی ۱۳۸۸ شمسی است که با توجه به آنکه تونل انتقال آب چشمه لنگان از سال ۱۳۸۴ به بهره‌برداری رسید، دبی رواناب به‌طور چشمگیری افزایش یافته است و دبی‌های اوج اغلب در ماه آوریل مصادف با ماه فروردین است که حوضه‌آبریز بیشترین میزان آبدهی را در بر دارد. به‌طور کلی عملکرد مدل برای بازه زمانی نشان داده‌شده مناسب ارزیابی می‌شود ولی بایستی اشاره شود که مدل در شبیه‌سازی دبی‌های حدی مانند دبی اوج عملکرد خوبی نشان نمی‌دهد، به‌عنوان مثال برای ماه آوریل سال ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ دبی رواناب به ترتیب برابر ۲۹/۹ و ۲۷ مترمکعب در ثانیه شبیه‌سازی‌شده است در صورتی که این مقادیر با توجه به داده‌های مشاهداتی برابر ۳۶/۴ و ۳۳/۷ مترمکعب در ثانیه اندازه‌گیری شده‌است.

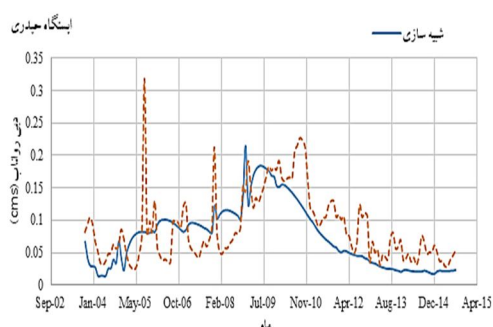
در شکل ۷-ب سری زمانی دبی رواناب خروجی از زیر حوضه آبریز قلعه شاهرخ-چلگرد نشان داده



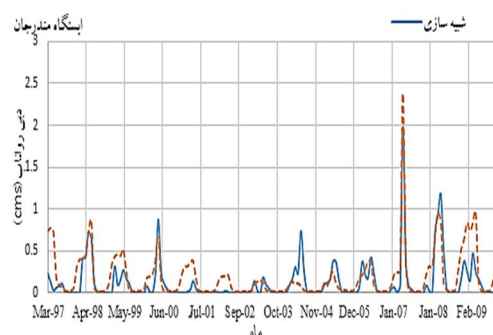
(ب)



(الف)



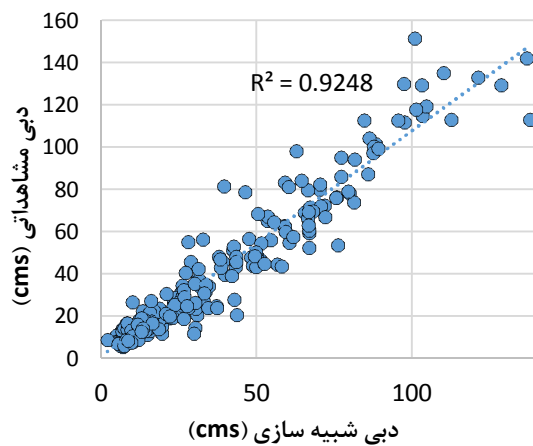
(ج)



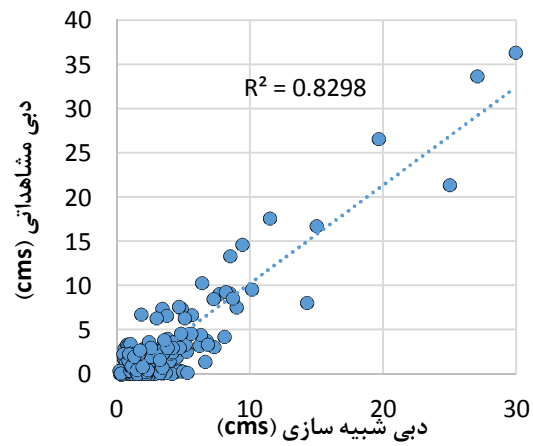
شکل ۷- سری زمانی دبی رواناب شبیه‌سازی‌شده و داده‌های مشاهداتی در الف: زیر حوضه دامنه-بوئین، ب: زیر حوضه قلعه شاهرخ-چلگرد، ج: زیر حوضه چادگان-چشمه

آبریز چادگان-یان چشمه با ضریب $NS=0.34$ و $1/57$ - NS به ترتیب برای ایستگاه‌های مندرجان و حیدری به دست می‌آیند که چنانچه به سیر تغییرات دبی رواناب توجه شود، نتایج قابل قبولی در مقایسه با داده‌های مشاهداتی برای حوضه‌های قلعه شاهرخ-چلگرد و بوئین-دامنه به دست آمده است ولی نتایج قابل قبولی برای حوضه چادگان-یان چشمه حاصل نشده است که نشان‌دهنده عملکرد ضعیف آن در پیش‌بینی رواناب برای بازه مطالعاتی است.

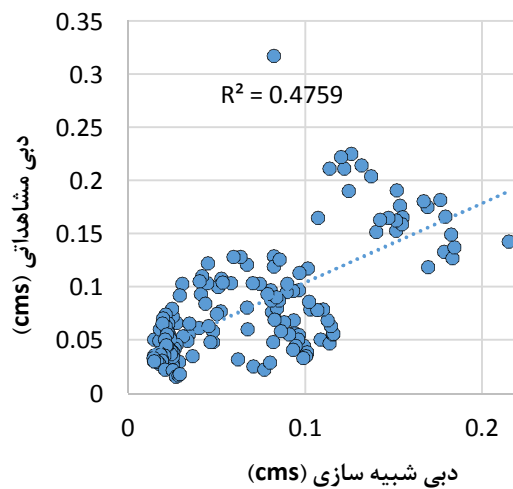
مدل واسنجی شده، با پارامترهای بهینه مشخص شده برای بازه زمانی سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷ میلادی به منظور صحت‌سنجی مدل به کار برده می‌شود. این مرحله جهت بررسی عملکرد مدل در پیش‌بینی رواناب انجام می‌شود و نتایج به دست آمده مطابق شکل ۹ است که در آن سری زمانی مقادیر پیش‌بینی شده به همراه داده‌های مشاهداتی نشان داده شده‌اند. برای دوره صحت‌سنجی ضرایب نش مدل حوضه آبریز بوئین-دامنه با ضریب $NS=0.58$ ، مدل حوضه آبریز قلعه شاهرخ-چلگرد با ضریب $NS=0.89$ ، مدل حوضه



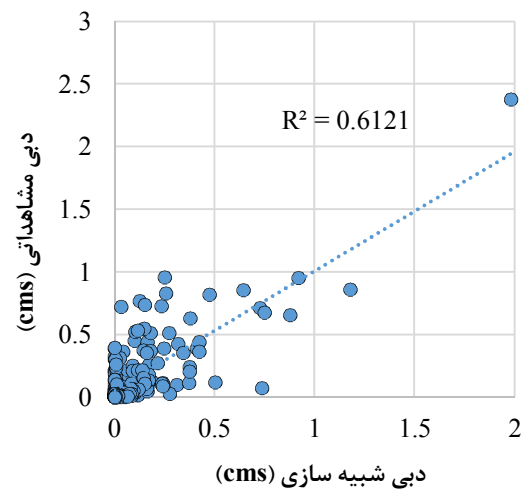
(ب)



(الف)



(د)

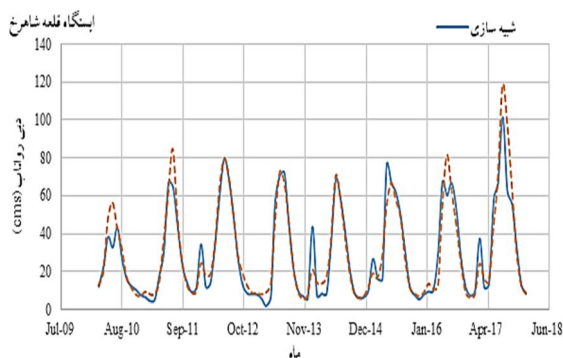


(ج)

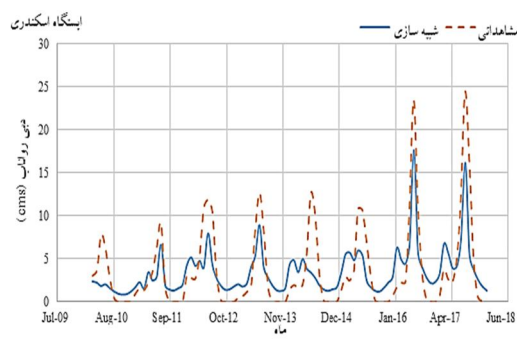
شکل ۸- نمودار پراکندگی داده‌های دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی شده در الف: ایستگاه اسکندری، ب: زیر حوضه قلعه شاهرخ-چلگرد، ج: ایستگاه مندرجان، د: ایستگاه حیدری

مستند ارائه شده توسط قسمت بهره‌برداری سازمان آب منطقه‌ای اصفهان مهیا شده است. با توجه به شکل می‌توان همبستگی خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و مشاهداتی به دست آورد که بدین منظور با استفاده از معیار همبستگی R^2 و ضریب نش-ساتنکلیف (NS) جریان سطحی شبیه‌سازی شده ارزیابی می‌شود. پس از محاسبات روابط معیارهای ذکر شده، مقادیر هر دو برابر ۰/۸۶ به دست می‌آید. شکل ۱۰-ب نیز نمودار پراکندگی داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی مربوط به جریان ورودی به مخزن را نشان می‌دهد.

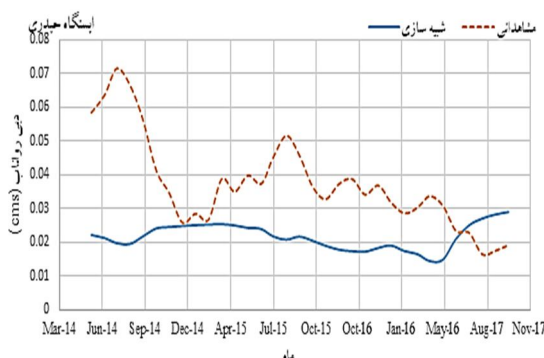
برآورد جریان ورودی به مخزن سد زاینده‌رود: جریان ورودی به مخزن سد زاینده‌رود به‌طور معمول از جمع جبری ورودی جریان‌های سطحی خروجی از ۴ زیر حوضه قلعه شاهرخ-چلگرد، دامنه-بوئین و چادگان- چشمه قابل تخمین است. در این بخش با توجه به شبیه‌سازی انجام شده بر زیر حوضه‌های مذکور توسط مدل SWAT و نتایج قابل قبول به دست آمده، جریان‌های سطحی شبیه‌سازی خروجی از زیر حوضه با یکدیگر جمع جبری شده و در مقایسه با مشاهدات مطابق شکل ۱۰-الف قابل رؤیت است. مشاهدات جریان سطحی ورودی به مخزن از آمار



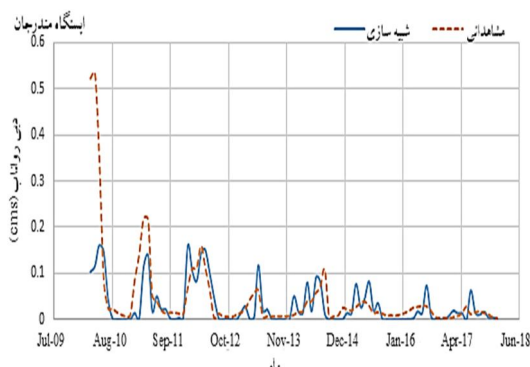
(ب)



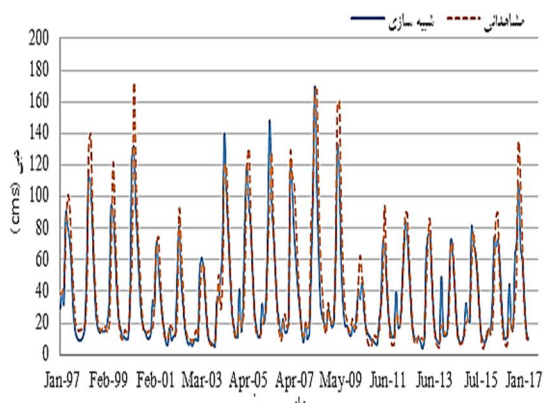
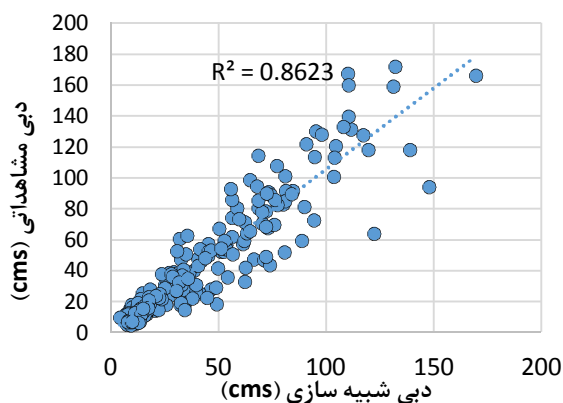
(الف)



(ج)



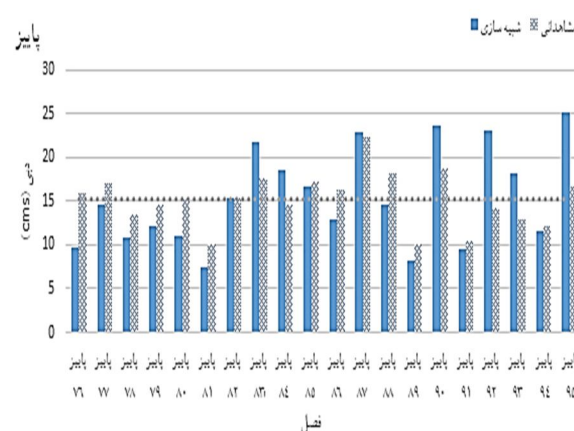
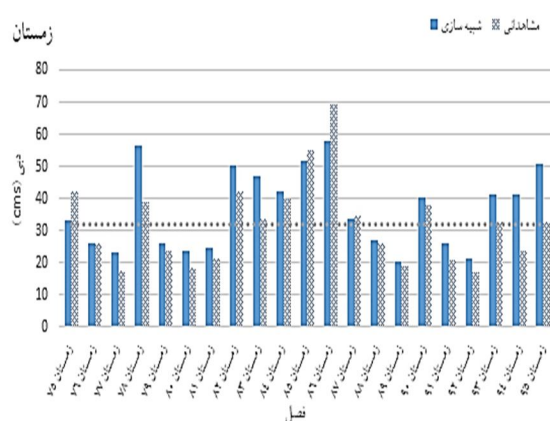
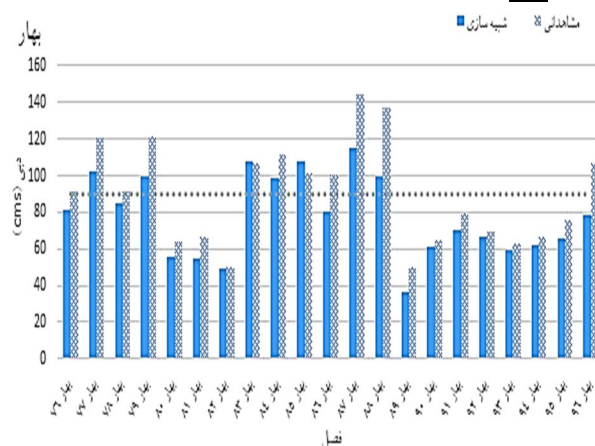
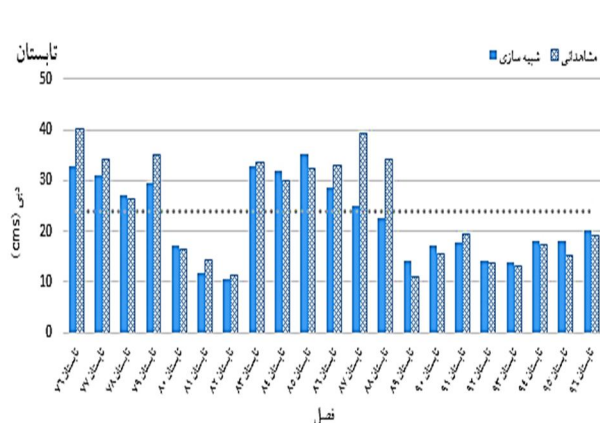
شکل ۹- سری زمانی دبی رواناب شبیه‌سازی شده در الف: زیر حوضه دامنه-بوئین، ب: زیر حوضه قلعه شاهرخ- چلگرد، ج: زیر حوضه چادگان-چشمه



شکل ۱۰- الف: سری زمانی دبی جریان شبیه‌سازی ورودی به مخزن سد زاینده‌رود در مقایسه با داده‌های مشاهداتی، ب: نمودار پراکندگی دبی جریان شبیه‌سازی و مشاهداتی ورودی به مخزن سد زاینده‌رود

۸۸ از متوسط بلندمدت آب ورودی به دلیل شرایط خشک‌سالی و افزایش مصارف در بالادست سد زاینده‌رود (دربازه ۸۸-۹۵) به مقدار قابل‌توجهی کاهش یافته است که مدل شبیه‌ساز SWAT به خوبی شرایط را شبیه‌سازی کرده است.

دبی متوسط بلندمدت فصلی ورودی به مخزن در چهار نمودار مندرج در شکل ۱۱ قابل رؤیت است که دبی میانگین فصل بهار بیشترین مقدار آبدهی را نسبت به فصل‌های دیگر به خود اختصاص می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از نمودارها، میزان دبی جریان ورودی به مخزن در سال آبی ۸۱-۷۹ و ۹۵-



شکل ۱۱- دبی متوسط فصلانه بلندمدت ورودی به مخزن سد زاینده‌رود

فیزیکی و هواشناسی منطقه مورد مطالعه دارند، بایستی داده‌هایی نظیر داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنج و داده‌های دمای ایستگاه‌های تبخیر-سنج برداشت شود. علاوه بر این اطلاعات، نقشه‌هایی که نشان‌دهنده کاربری اراضی منطقه، توپوگرافی و همچنین پروفیل خاک منطقه است جهت شبیه‌سازی دبی رواناب خروجی مورد نیاز است. همچنین وجود ایستگاه‌های هیدرومتری جهت مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های مشاهداتی برداشت‌شده از این ایستگاه‌ها ضروری است. مقیاس زمانی داده‌های هواشناسی مورد نیاز در SWAT به صورت روزانه بوده و خروجی مدل که شامل دبی رواناب خروجی از حوضه است به صورت ماهانه استخراج شد.

مدل فیزیکی و نیمه توزیعی SWAT جهت شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب توسعه و اجرا شده که

نتیجه‌گیری

با توجه به وقوع پدیده تغییر اقلیم در سال‌های اخیر، تغییرات در پارامترهای تأثیرگذار در این پدیده سبب شده است تا پاسخ‌های هیدرولوژیک حوضه‌های آبخیز تحت تأثیر قرار گرفته و این پدیده بر روی کمیت و کیفیت منابع آب سطحی همچون دریاچه‌ها، آبگیرها و مخازن سدها تأثیرگذار بوده و باعث ایجاد مشکلات متعدد در تخصیص منابع آب به‌ویژه از سدها شده است. در این مطالعه مدل فیزیکی هیدرولوژیکی SWAT جهت شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب در زیر حوضه‌های آبریز بالادست حوضه آبریز زاینده‌رود در نظر گرفته شد که در نهایت با استفاده از رواناب شبیه‌سازی‌شده، جریان ورودی به مخزن سد زاینده‌رود برآورد شده است. با توجه به این مسئله که مدل‌های فیزیکی نیاز به اطلاعات و ویژگی‌های

توسط مدل نشان داده شد و از جمع جبری سه رواناب جریان ورودی برآورد شد که ضرایب خطای یاد شده برابر ۰/۸۶ به دست آمده است. این نتیجه نمایانگر دقت بالای مدل‌ها در شبیه‌سازی است. دقت بالای مدل به برنامه‌ریزی‌های مدیریتی جهت مقابله با پدیده اقلیمی تاثیر گذار بر مخزن سدها تاثیر به سزایی دارد.

پس از واسنجی و تنظیم پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی عملکرد مدل مناسب ارزیابی شده که این ارزیابی با ضریب خطای نش (Nash-Sutcliffe) و ضریب همبستگی R^2 انجام شد. بر اساس رواناب خروجی از سه زیر حوضه بوئین-دامنه، قلعه شاهرخ-چلگرد و چادگان-چشمه شبیه‌سازی شده نتایج قابل قبولی برای شبیه‌سازی در سه زیر حوضه مذکور

منابع

- maximum precipitation and probable maximum flood parameters', *Journal of Environmental Science Studies*, 5(4), pp. 2982–2989. Available at: http://www.jess.ir/article_113402.html.
9. Khalili, R. et al. (2021) 'Simultaneous removal of binary mixture dyes using Mn - Fe layered double hydroxide coated chitosan fibers prepared by wet spinning', *Surfaces and Interfaces*, p. 100976. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surf.2021.100976>.
10. Khalili, R. Montaseri, H. and Motaghi, H. (2021) 'Evaluation of water quality in the Chalus River using the statistical analysis and water quality index (WQI)', *Water and Soil Management and Modelling*. doi: 10.22098/mmws.2021.9300.1031.
11. Khalili, R., Zali, A. and Motaghi, H. (2021) 'Evaluating the Heavy Metals in the Water and Sediments of Haraz River, Using Pollution Load Index (PLI) and Geo accumulation Index (Igeo)', *Iranian Journal of Soil and Water Research*. doi: 10.22059/ijswr.2021.316080.668850.
12. Li, C. and Fang, H. (2021) 'Assessment of climate change impacts on the streamflow for the Mun River in the Mekong Basin, Southeast Asia: Using SWAT model', *Catena*, 201, p. 105199.
13. Li, M., Di, Z. and Duan, Q. (2021) 'Effect of sensitivity analysis on parameter optimization: case study based on streamflow simulations using the SWAT model in China', *Journal of Hydrology*, 603, p. 126896.
14. Van Liew, M.W., Arnold, J.G. and Bosch, D.D. (2005) 'Problems and potential of autocalibrating a hydrologic
1. Aawar, T. and Khare, D. (2020) 'Assessment of climate change impacts on streamflow through hydrological model using SWAT model: a case study of Afghanistan', *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(3), 1427–1437.
2. Akoko, G. et al. (2021). 'A review of SWAT model application in Africa', *Water*, 13(9), p. 1313.
3. Bouslihim, Y. et al. (2019). 'Understanding the effects of soil data quality on SWAT model performance and hydrological processes in Tamedroust watershed (Morocco)', *Journal of African Earth Sciences*, 160, p. 103616.
4. Dhami, B. et al. (2018). 'Evaluation of the SWAT model for water balance study of a mountainous snowfed river basin of Nepal', *Environmental Earth Sciences*, 77(1), 1–20.
5. Hallouz, F. et al. (2018). 'Modeling of discharge and sediment transport through the SWAT model in the basin of Harraza (Northwest of Algeria)', *Water Science*, 32(1), 79–88.
6. Himanshu, S.K. et al. (2019). 'Evaluation of best management practices for sediment and nutrient loss control using SWAT model', *Soil and Tillage Research*, 192, 42–58.
7. Jeon, D.J. et al. (2019). 'Evaluating the influence of climate change on the fate and transport of fecal coliform bacteria using the modified SWAT model', *Science of the Total Environment*, 658, pp. 753–762.
8. Khalili, R., Parvinnia, M. and Motaghi, H. (2021) 'The effects of forecasted precipitation amount on probable

- Journal, 6(2), pp. 194–209.
23. Pang, S. et al. (2020). 'Development and testing of a modified SWAT model based on slope condition and precipitation intensity', *Journal of Hydrology*, 588, p. 125098.
 24. Saade, J. et al. (2021). 'Modeling Impact of Climate Change on Surface Water Availability Using SWAT Model in a Semi-Arid Basin: Case of El Kalb River, Lebanon', *Hydrology*, 8(3), p. 134.
 25. Senent-Aparicio, J. et al. (2019). 'Coupling machine-learning techniques with SWAT model for instantaneous peak flow prediction', *Biosystems engineering*, 177, pp. 67–77.
 26. Shi, W. and Huang, M. (2021). 'Predictions of soil and nutrient losses using a modified SWAT model in a large hilly-gully watershed of the Chinese Loess Plateau', *International Soil and Water Conservation Research*, 9(2), pp. 291–304.
 27. Vilaysane, B. et al. (2015). 'Hydrological stream flow modelling for calibration and uncertainty analysis using SWAT model in the Xedone river basin, Lao PDR', *Procedia Environmental Sciences*, 28, pp. 380–390.
 28. Wang, Y. et al. (2019). 'Soil and water assessment tool (SWAT) model: A systemic review', *Journal of Coastal Research*, 93(SI), pp. 22–30.
 29. Wu, J. et al. (2019). 'Assessing the impact of human regulations on hydrological drought development and recovery based on a 'simulated-observed' comparison of the SWAT model', *Journal of Hydrology*, 577, 123990.
 30. Yuan, Y. and Koropecjy-Cox, L. (2022). 'SWAT model application for evaluating agricultural conservation practice effectiveness in reducing phosphorous loss from the Western Lake Erie Basin', *Journal of Environmental Management*, 302, p. 114000.
 31. Zhang, H. et al. (2020). 'Using an improved SWAT model to simulate hydrological responses to land use change: A case study of a catchment in tropical Australia', *Journal of Hydrology*, model', *Transactions of the ASAE*, 48(3), pp. 1025–1040.
 15. Luan, X. et al. (2018) 'Quantitative study of the crop production water footprint using the SWAT model', *Ecological Indicators*, 89, pp. 1–10.
 16. Mahaffey, C. et al. (2020). 'Impacts of climate change on dissolved oxygen concentration relevant to the coastal and marine environment around the UK', *MCCIP Science Review 2020*, pp. 31–53.
 17. Mahtsente, T., Assefa, M. M. and Dereje, H. (2017). 'Rainfall-runoff relation and runoff estimation for Holetta River, Awash subbasin, Ethiopia using SWAT model', *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 9(5), 102–112.
 18. Mehrparvar, M., Asghari, K. and Golmohammadi, M.H. (2019). 'Reducing Error of Rainfall-Runoff Simulation Using Coupled Hydrological SWAT Model and Data Assimilation Technique', *Iran-Water Resources Research*, 14(5), pp. 85–102. Available at: http://www.iwrr.ir/article_65744.html.
 19. Mengistu, A.G., van Rensburg, L.D. and Woyessa, Y.E. (2019). 'Techniques for calibration and validation of SWAT model in data scarce arid and semi-arid catchments in South Africa', *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 25, p. 100621.
 20. Mohammadi, H., khalili, R. and Mohammadi, S. (2021). 'Forecasting future temperature and precipitation under the effects of climate change using the LARS-WG climate generator (Case Study: South Zagros Region of Iran)', *Nivar*, 45(114–115), pp. 137–153. doi: 10.30467/nivar.2022.319565.1209.
 21. Myers, D. T., Ficklin, D. L. and Robeson, S. M. (2021). 'Incorporating rain-on-snow into the SWAT model results in more accurate simulations of hydrologic extremes', *Journal of Hydrology*, 603, p. 126972.
 22. Oo, H.T., Zin, W.W. and Kyi, C.C.T. (2020). 'Analysis of streamflow response to changing climate conditions using SWAT model', *Civil Engineering*

585, p. 124822.

