

مقاله پژوهشی

مدل سازی اثر انتقال بین حوضه‌ای بر ارزیابی بیلان آب (مطالعه موردی: حوضه قلعه‌شاهرخ زاینده‌رود)

اسماعیل ادیب‌مجد^{۱*}، رسول میرعباسی نجف‌آبادی^۲، مهدی اسدی آقبلاغی^۳ و سید حسن طباطبائی^۴

چکیده

در بسیاری از حوضه‌های آبریز شامل طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای، به‌ویژه اگر بخشی از انتقال به‌صورت زیرزمینی باشد، اطلاعات کافی درباره سهم و تأثیر انتقال بر بیلان آب حوضه وجود ندارد. مدل‌سازی تلفیقی با استفاده از نرم‌افزار SWAT و نتایج مدل آب زیرزمینی FEFLOW برای منطقه مجاور و نیز توسعه یک مدل بیلان آب رودخانه در حوضه قلعه‌شاهرخ که ارزیابی مؤلفه‌های کل جریان حوضه را امکان‌پذیر می‌کند، از نوآوری‌های این پژوهش است. مؤلفه‌های جوی بیلان آب، با استفاده از نرم‌افزار SWAT برآورد شدند و رواناب مستقیم و نفوذ حاصل از تبدیل بارش به رواناب به دست آمد. از طرفی استفاده از نتایج مدل FEFLOW، در آبخوان محدوده مطالعاتی مجاور حوضه تحقیق، تخمین آب برگشتی به جریان آب زیرزمینی و تبادلات با آب سطحی را امکان‌پذیر ساخت. با توسعه یک مدل بیلان آب رودخانه‌ای، اجزاء آب سطحی همچون رواناب مستقیم، جریان پایه، مقادیر آب انتقالی سطحی توسط تونل و جریان خروجی از چشمه به‌عنوان انتقال آب زیرزمینی بین حوضه‌ای، در بیلان آب تعیین شدند. نتایج نشان داد حدود ۶۳ درصد جریان خروجی از حوضه مطالعاتی، مربوطه به انتقال آب سطحی و زیرزمینی از خارج حوضه است؛ بنابراین سیاست‌گذاران باید توسعه نظارت کمی و کیفی حریم انتقال را جدی قلمداد کنند.

واژه‌های کلیدی: بیلان آب، منابع آب سطحی، مدل‌سازی هیدرولوژیکی، نرم‌افزار SWAT، مدیریت منابع آب.

ارجاع: ادیب‌مجد ا.، میرعباسی نجف‌آبادی ر.، اسدی آقبلاغی م. و طباطبائی س. ح. ۱۴۰۳. مدل‌سازی اثر انتقال بین حوضه‌ای بر ارزیابی بیلان آب (مطالعه موردی: حوضه قلعه‌شاهرخ زاینده‌رود). مجله پژوهش آب ایران. ۵۵: ۷۹-۹۲. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2024.14967.2638>

۱- دانشجوی دکتری منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۴- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: e.adibmajd@stu.sku.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۸

مقدمه

آب یکی از مهمترین منابع طبیعی است که به‌عنوان اساس زندگی بشری و پایه فعالیت‌های اقتصادی شناخته می‌شود. در چند دهه اخیر، به دلیل تغییرات آب و هوایی، رشد جمعیت و فعالیت‌های انسانی، برداشت از منابع آب افزایش یافته است؛ لذا به‌منظور مدیریت صحیح منابع آب، شناخت دقیق اجزاء بیلان آب به یک ضرورت تبدیل شده است (Shen and Chen, 2010). مدل‌های هیدرولوژیکی به‌عنوان ابزارهای معتبری برای ارزیابی بیلان آب یک منطقه توسعه داده شده‌اند. رویکرد مدل‌سازی هیدرولوژیکی سنتی بر داده‌های مشاهده‌شده در ایستگاه تکیه دارد. اغلب اوقات دسترسی به داده‌های مشاهداتی درازمدت محدود است. در سال‌های اخیر، محاسبه بیلان آب حوضه بر حسب رواناب، جریان پایه و تغذیه در مقیاس زیرحوضه با کمک مجموعه داده‌های بازتحلیل آب و هوا مبتنی بر ایستگاه و مجموعه داده‌های مدل‌های جهانی امکان پذیر شده است و خروجی مدل بر اساس داده‌های اندازه‌گیری رودخانه واسنجی می‌شود. به این ترتیب تناسب معقولی بین رواناب شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده به‌دست می‌آید (Mistry et al., 2023). از دیرباز بیلان آب با استفاده از اصل بقای جرم و با به‌کار بردن معادله پیوستگی تعریف شده است. همچنین معادلات بیلان آب برای هر منطقه در هر دوره زمانی ارزیابی شده‌اند (Ridder and Boonstra, 1994). به کارگیری مدل‌های بیلان آب علاوه بر کاربردهای متعدد، نیاز به توسعه، بلوغ و بروزرسانی دارند. به‌عنوان مثال، شبیه‌سازی کامپیوتری بیلان آب حوضه‌های آبریز برای تخمین رواناب حاصل از بارندگی در استرالیا حدود چهار دهه پیش آغاز شد، ولی در حال حاضر یک فناوری پیشرفته با مدل‌های متعدد برای طراحی سیستم‌های تامین آب کشاورزی و شهری، برآورد سیل، تخصیص و مدیریت منابع آب روستایی و فاضلاب در مناطق شهری و مدیریت اکوسیستم‌های آبی استفاده می‌شود (Boughton, 2004). با این حال هنوز هم تخمین برخی اجزاء بیلان آب به‌طور مستقیم دشوار است و به‌طور غیرمستقیم از طریق مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی یا با استفاده از روش‌های تجربی تخمین زده می‌شوند (Falalkis and Gemtzi, 2020). چالش اصلی در مدل‌سازی جریان^۱، تولید پیش‌بینی‌های معتبر در

حوضه‌های فاقد اندازه‌گیری است. در این حوضه‌ها برآورد پارامترهای مدل از مناطق مجاور امکان‌پذیر است. این فرآیند تخمین پارامتر در غیاب واسنجی مستقیم، تحلیل منطقه‌ای نامیده می‌شود (Viney et al., 2014).

حوضه آبریز رودخانه زاینده‌رود، در مرکز ایران، با اقلیم نیمه خشک و مصارف بزرگ کشاورزی، صنعتی و خانگی، نمونه‌ای از سیستم‌های پیچیده حوضه آبریز است. این در حالی است که در حوضه زاینده‌رود هنوز مطالعه جامعی برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی اجزاء بیلان منابع آب انجام نشده است (Besalatpour et al., 2020). در این حوضه اثر ترکیبی عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی موجب بروز بحران کمبود آب شده و سوء مدیریت در حوضه زاینده‌رود این بحران را تشدید کرده است. تعدادی از محققان، بحران حوضه آبریز زاینده‌رود را نه موقتی، بلکه آن را یک بحران دائمی که منطقه مرکزی کشور را از نظر اکولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی تهدید می‌کند، می‌دانند (Ziaei, 2020). همچنین Javadinejad (2016) نقش تغییرات آب و هوایی و فعالیت‌های انسانی را در وقوع خشکسالی و کمبود آب در دوره گذشته و آینده بسیار مهم دانسته است. بررسی تغییرات کاربری اراضی به‌عنوان یکی از عوامل انسانی موثر بر سیستم‌های آبی و همچنین ارتباط آن با کیفیت آب در مقیاس کل حوضه زاینده‌رود، نشان می‌دهد که همزمان با افزایش اراضی شهری و کشاورزی طی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۴، اراضی بایر، پوشش گیاهی و پوشش آبی روند کاهشی داشته است. علاوه بر این، کاربری‌های مختلف زمین در مقیاس‌های مختلف تا حدی با متغیرهای کیفیت آب همبستگی نشان می‌دهند (Saedpanah et al., 2021). علاوه بر عوامل انسانی، تأثیرات تغییر اقلیم بر کاهش آب در مخزن زاینده‌رود و مخازن مشابه در مناطق خشک به نگرانی قابل توجهی تبدیل شده است. جریان ورودی زاینده‌رود به مخزن سد احتمالاً ۴۰ تا ۵۰ درصد در طول دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۵ نسبت به دوره پایه ۱۹۸۱-۲۰۰۶ کاهش می‌یابد.

شناخت دقیق بیلان منابع آب یکی از ارکان کلیدی مدیریت پایدار منابع آبی به شمار می‌آید. در حوضه زاینده‌رود، این شناخت به‌منظور بهبود سیاست‌های موجود و دستیابی به یک مدیریت مؤثر و پایدار ضروری است. حوضه قلعه شاهرخ یکی از زیرحوضه‌های آبی مهم در زاینده‌رود است که به دلیل چالش‌های مختلفی نظیر

محدوده پژوهش و استفاده تلفیقی از آب سطحی و زیرزمینی نمای کلی از فرایندهای هیدرولوژیکی منطبق با مدل چرخه آب^۲ حوضه آبریز قلعه شاهرخ در شکل ۲ ترسیم شده است. در این طرحواره، انتقال آب سطحی به شبکه آبراهه‌ها، موقعیت اراضی کشاورزی، ایستگاه‌های اندازه‌گیری و همچنین موقعیت دریاچه و سد زاینده‌رود در پایین‌دست حوضه نشان داده شده است. علاوه بر فرایند بارش - رواناب، تبادلات طبیعی و مصنوعی آب سطحی و زیرزمینی اهمیت زیادی دارد. برای توسعه مدل بیلان آب، ابتدا داده‌های موجود شامل اطلاعات اقلیمی، هیدرولوژیکی و جغرافیایی جمع‌آوری شد. داده‌های اقلیمی شامل باران، برف، بیشینه و کمینه دمای هوا و رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی برای ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی وزارت نیرو و ایستگاه‌های سینوپتیک و کليماتولوژی سازمان هواشناسی برای یک دوره زمانی ۲۵ ساله از ۱۳۷۶ تا ۱۴۰۰ استفاده شد. اطلاعات دبی جریان‌های سطحی نیز از ایستگاه‌های هیدرومتری وزارت نیرو برای همین دوره زمانی اخذ شد. نقشه‌های سازمان زمین‌شناسی، کاربری اراضی و خاک، الگوی کشت، سطح اراضی کشاورزی منطقه و آماربرداری آب‌های زیرزمینی از شرکت‌های آب منطقه‌ای و سازمان جهاد کشاورزی تهیه شد.

روش‌شناسی

در پژوهش حاضر، ابتدا مدل مفهومی بیلان آب بر اساس فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه تدوین شد. اجزائی از جمله تبخیر-تعرق، بارش، جریان‌های سطحی و زیرزمینی در نظر گرفته شد. تبدیل بارش به رواناب در سطح حوضه توسط مدل ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) انجام شد. تحقیقات قبلی کاربرد مدل SWAT برای شبیه‌سازی جریان رودخانه در حوضه زاینده‌رود را مناسب دانسته‌اند (Ababaei and Sohrabi, 2009; Besalatpour et al., 2020). این مدل قادر است کلیه اجزاء بیلان را محاسبه نماید. از اجزاء این مدل، متغیرهای بارش، رواناب مستقیم، نفوذ، مصارف و تبخیر-تعرق واقعی استخراج شد. این موضوع با توجه به داده‌های موجود و عدم امکان واسنجی برای غیر از رواناب سطحی، قابل درک است. مقیاس زمانی

تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و فعالیت‌های انسانی در معرض خطر است. با توجه به اهمیت مدیریت منابع آب، این تحقیق به شناسایی وضعیت بیلان آب این حوضه و سهم تأثیرات ناشی از انتقال‌های طبیعی و مصنوعی بر آن می‌پردازد. به‌منظور شناخت اجزاء بیلان و چرخه آب با گام‌های زمانی ماهانه، مدل‌های هیدرولوژیکی و شواهد منطقه‌ای و محلی به‌صورت ترکیبی استفاده خواهند شد و با در نظر گرفتن انتقال‌های سطحی و جریان آب زیرزمینی بین حوضه‌ای (IGF^۱)، بیلان مهمترین منابع آبی ورودی به مخزن سد زاینده‌رود ارزیابی می‌شود. به دلیل استفاده شرب از آب این حوضه و قرار گرفتن سد زاینده‌رود مجاور خروجی آن، مدیریت کل منابع آب شامل منابع انتقالی، اهمیت دارد. تعیین سهم انتقال از کل خروجی و دامنه تغییر آن در سال‌های مختلف با استفاده از روش ترکیب مدل‌های هیدرولوژیکی، مدل رودخانه‌ای و مدل آب زیرزمینی را می‌توان نوآوری این تحقیق دانست.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و منابع داده

حوضه آبریز زاینده‌رود با مساحت تقریبی بیش از ۲۶ هزار کیلومتر مربع در فلات مرکزی ایران قرار دارد. این حوضه یکی از مهمترین و شناخته‌شده‌ترین حوضه‌های آبریز ایران است. سد زاینده‌رود به‌عنوان یک مخزن ذخیره، مدیریت مصارف پایین‌دست را به عهده دارد (Ahmadi et al., 2022). در این مطالعه، مهمترین زیرحوضه بالادست سد زاینده‌رود به نام قلعه شاهرخ با مساحتی معادل ۱۴۳۴ کیلومتر مربع به‌عنوان محدوده تحقیق انتخاب شد. تونل کوهرنگ یک از سال ۱۳۳۳ و تونل کوهرنگ دو از سال ۱۳۶۵، انتقال آب از رودخانه کوهرنگ به این حوضه را انجام می‌دهند. شکل ۱-الف حوضه آبریز زاینده‌رود را نشان می‌دهد. همچنین زیرحوضه‌های بالادست سد زاینده‌رود در غرب حوضه با رنگ متفاوت مشخص شده‌اند. در شکل ۱-ب نیز زیرحوضه قلعه شاهرخ در بالادست سد با مرز قرمز رنگ و در راستای جنوب غربی - شمال شرقی واقع شده است. در خروجی این حوضه ایستگاه اندازه‌گیری قلعه‌شاهرخ و در ورودی آن ایستگاه تنگ‌گری، جریان‌ات سطحی را ثبت می‌کند. باتوجه‌به ویژگی‌های

تحقیق برای یک دوره ۳۰ ساله از ۱۹۹۳ میلادی تا ۲۰۲۲، به صورت ماهیانه و با احتساب دوره آماده‌سازی^۱ مدل استفاده شد. به منظور قابل مقایسه بودن نتایج، چنانچه در شکل ۳ مشخص شد واحدهای عکس‌العمل هیدرولوژیکی (HRU^۲) منطبق بر مطالعات قبلی حوضه و بر اساس نقشه‌های رقومی^۳ تعریف شد. شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژی در حوضه، دو مرحله کنترل مقدار آب در کانال اصلی و روندیابی تا نقطه خروجی را دربرمی‌گیرد. داده‌های اقلیمی شامل کمینه و بیشینه دمای هوا، سرعت باد، ساعات آفتابی و رطوبت نسبی در قالب فایل‌های ASCII برای همه ایستگاه‌ها آماده شد. این داده‌ها با استفاده از شبیه‌ساز آب و هوای^۴ SWAT در مدل وارد شد. این شبیه‌ساز قادر است داده‌های گم شده، داده‌های آماری با طول کم و یا فاقد آمار را بر اساس نزدیک‌ترین ایستگاه اندازه‌گیری تکمیل کند. برآورد داده‌های بارش با به‌کارگیری معادله نیکس^۵، داده‌های دمای کمینه و بیشینه و تابش خورشیدی با معادله پیوستگی^۶، داده‌های سرعت باد با تابع نمایی^۷ و داده‌های رطوبت نسبی با معادله پراکنش مثلی^۸ انجام شد. در مدل بارش - رواناب به کار گرفته شده، علاوه بر نقاط مدیریتی، رواناب سطحی ورودی به حوضه از طریق تونل‌ها، چشمه‌ها و مصارف نیز تعریف شد. اساس چرخه هیدرولوژی در مدل SWAT به صورت رابطه بیلان آبی زیر است:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{t=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

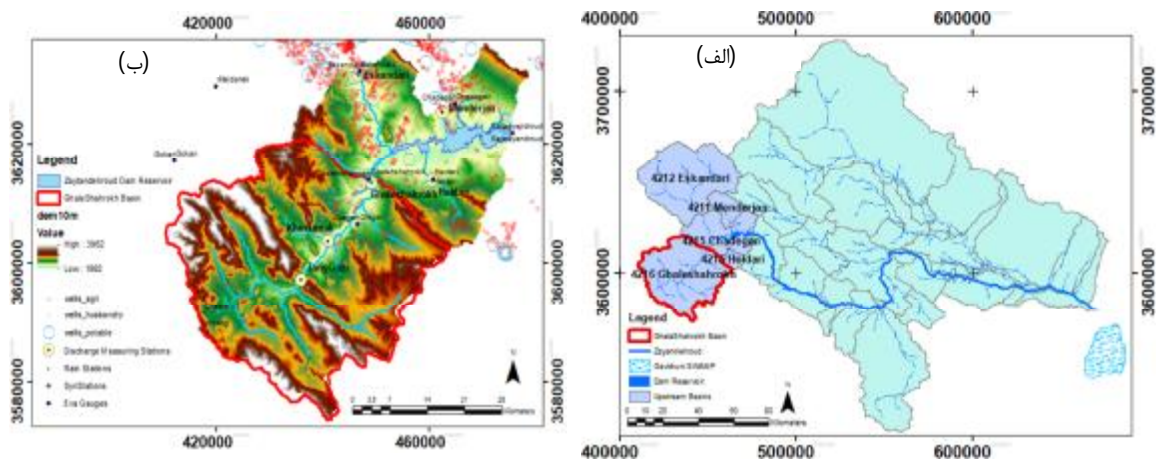
که در آن، SW_0 و SW_t به ترتیب مقدار فعلی و اولیه آب در خاک بر حسب میلی‌متر آب و R_{day} ، Q_{surf} ، E_a ، W_{seep} و Q_{gw} به ترتیب مقدار بارندگی، رواناب سطحی، تبخیر-تعرق، آب ورودی به ناحیه غیراشباع پروفیل خاک و مقدار آب برگشتی در ماه i ام بر حسب میلی‌متر است. به این ترتیب مقدار رواناب ابتدا در هر HRU محاسبه می‌شود تا با روندیابی و ترکیب هیدروگراف‌ها محاسبه برای کل حوضه انجام شود. در ادامه نقشه کاربری اراضی،

نقشه‌های خاک و شیب، داده‌های اقلیمی و اندازه‌گیری‌های دبی جریان به مدل وارد شد. مدل هیدرولوژیکی حوضه آبریز قلعه‌شاهرخ با استفاده از نقشه کاربری اراضی، منابع آب، داده‌های مصرف‌کنندگان، انتقال آب از تونل‌های اول و دوم کوهرنگ، اطلاعات نقاط مدیریتی و داده‌های هیدرومتری ایستگاه واقع شده در خروجی حوضه به کمک الگوریتم SUFI-2 از بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP واسنجی و صحت سنجی شد. قبل از واسنجی، سنجش اولیه از عملکرد مدل با شناخت عوامل تاثیرگذار انجام شد. در این مرحله مشخص شد به طور عمومی ایستگاه هیدرومتری قلعه‌شاهرخ تحت تاثیر انتقال آب به حوضه و مصارف کشاورزی بالادست است. اثر انتقال آب بر میزان بیشینه جریان، جریان پایه و تاخیر زمانی در نوسانات دبی ایستگاه وجود داشت. الگوریتم SUFI-2، در واقع به صورت معکوس مدل SWAT عمل می‌کند و قادر است با استفاده از معیارهای آماری خود، واسنجی را ارزیابی کند. واسنجی و تحلیل عدم قطعیت در این برنامه بطور همزمان رخ می‌دهد و تلاش می‌کند با استفاده از تکنیک نمونه‌برداری، پارامترهای واسنجی را در ناحیه ۹۵ درصد عدم قطعیت مربوط به توزیع احتمال تجمعی هر متغیر خروجی تخمین بزند. در تحقیق حاضر، روش تحلیل حساسیت مطلق برای بررسی حساسیت مدل به پارامترهای ورودی و تأثیر هر پارامتر بر میزان رواناب شبیه‌سازی شده، استفاده شد. CN2 مهمترین پارامتر حساس مورد بررسی است که معرف عدد منحنی رواناب در شرایط رطوبتی نوع دو می‌باشد که تغییر اندک آن، اثر فاحشی بر میزان اوج جریان و جریان پایه شبیه‌سازی می‌گذارد. علاوه بر پارامترهای فیزیکی شبیه‌سازی برف نیز به دمای هوا بسیار حساس می‌باشد. پارامتر CH_K2 معرف هدایت هیدرولیکی موثر در آبراهه اصلی، SOL_BD نمایان‌گر چگالی ظاهری خاک، SOL_AWC بیان‌گر متوسط آب قابل استفاده خاک توسط گیاه، GW_DELAY معرف زمان تاخیر برای آب زیرزمینی، SHALLST بیان‌کننده عمق اولیه آب در آبخوان آزاد و ۲۶ پارامتر دیگر نسبت به میزان جریان و اوج آن حساس‌اند. تلاش برای واسنجی چندمنظوره همزمان برای مقادیر رواناب مستقیم، اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی، آب برگشتی و جریان پایه به نتیجه نرسید. به این ترتیب حساسیت مدل نسبت به پارامترهای حساس و غیرحساس تحلیل شد. نکته قابل

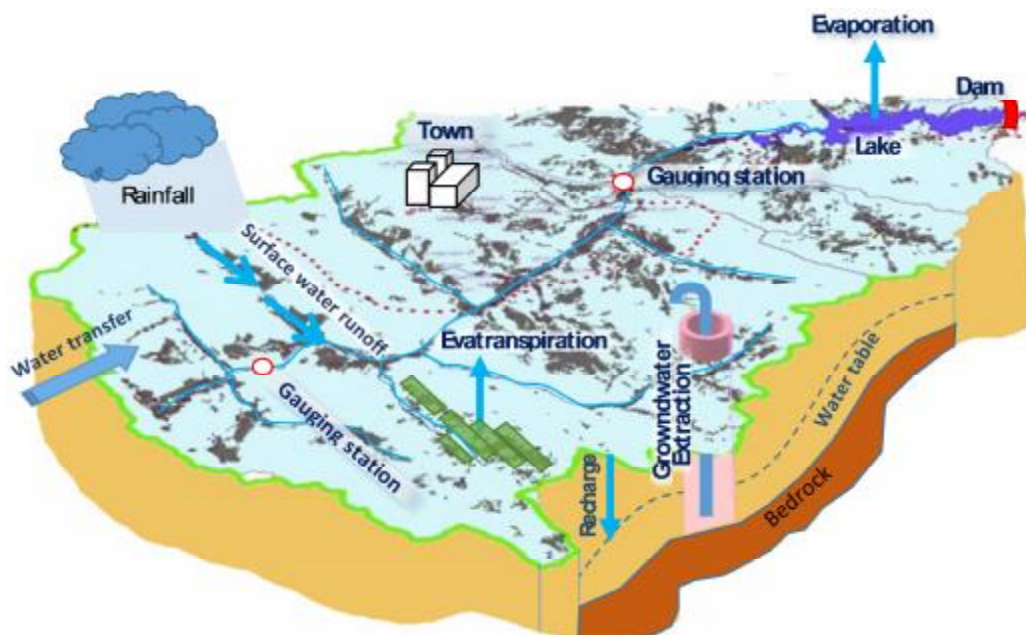
- 1- Warmup
- 2- Hydrological Response Units
- 3- Digital Elevation Model, DEM
- 4- Weather generator, WGEN
- 5- Nicks
- 6- Continuity Equation
- 7- Exponential Equation
- 8- Triangular Distribution

دقت منجر شود. توسعه یک مدل بیلان رودخانه با استفاده از معادله پیوستگی (رابطه ۲) توسعه داده شد تا بتوان اجزائی مثل دبی پایه، آب برگشتی و جریان‌های انتقالی را با اجزاء مدل SWAT تلفیق کرد. شکل ۴ مدل مفهومی روابط بین اجزاء مدل بیلان آب در محدوده حوضه قله شاهرخ را نشان می‌دهد. باتوجه به این که تعادل آب در رودخانه‌های حوضه، نتیجه تعامل پیچیده‌ای از عوامل طبیعی و انسانی است و به‌طور قابل توجهی بر سطوح دیگر تأثیر می‌گذارد. بنابراین مدل‌سازی بیلان آب رودخانه به‌طور اختصاصی آب‌های انتقالی، جریان پایه و آب‌های برگشتی ناشی از مصارف را مورد توجه قرار خواهد داد.

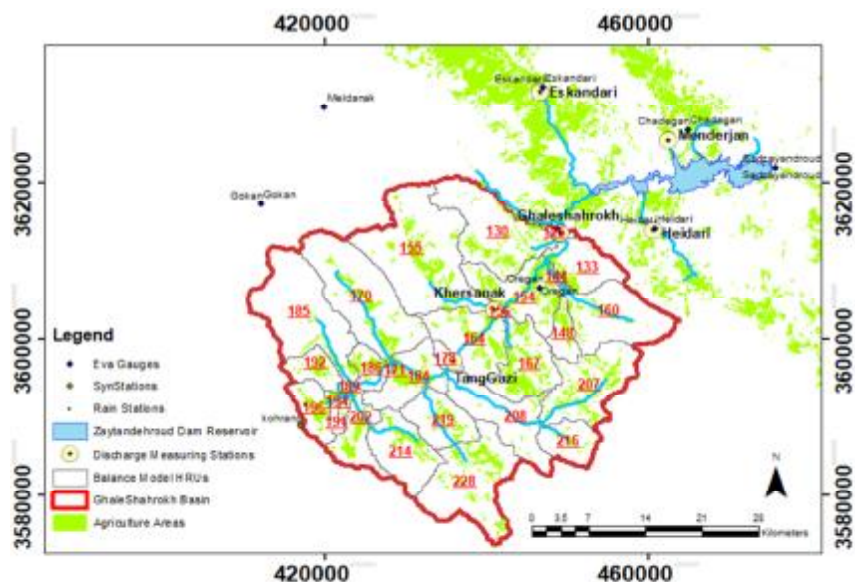
توجه در شبیه‌سازی حوضه قله‌شاهرخ با مدل SWAT، این است که اجبار کردن مدل به واسنجی همزمان با داده‌های مشاهداتی جریان انتقالی و همچنین داده‌های مدل آب زیرزمینی FEFLOW، منجر به غیرقابل پذیرش شدن نتایج مدل می‌شود. علت این موضوع را می‌توان به عدم اطلاعات کافی در مورد پارامترهای فیزیکی، پیچیدگی حوضه و فقر اطلاعات نفوذ، مشخصات مربوط به آب زیرسطحی، اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی و بسیاری اطلاعات از این دست نسبت داد. بنابراین برای بهبود اعتبار سایر اجزاء بیلان آب، مدل‌سازی ترکیبی انجام شد تا در نهایت به هم‌افزایی بین دو مدل و بهبود



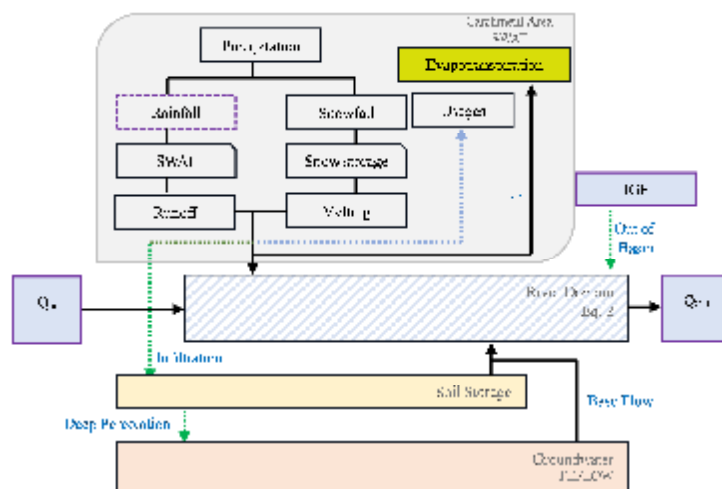
شکل ۱- موقعیت زیرحوضه قله‌شاهرخ به‌عنوان محدوده تحقیق در حوضه زاینده‌رود



شکل ۲- طرح‌واره اجزاء و فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه قله‌شاهرخ



شکل ۳- محدوده حوضه قلعه شاهرخ در بالادست سد زاینده‌رود و تقسیمات واحدهای عکس‌العمل هیدرولوژیکی (HRU)



شکل ۴- مدل مفهومی روابط بین اجزاء مدل بیلان آب در حوضه قلعه شاهرخ

آن به آب‌های سطحی از طریق چشمه دیمه در تحقیق حاضر در نظر گرفته شد. با داشتن مقدار رواناب ناشی از بارش، نفوذ و تلفات، معادله بیلان آب منطبق بر مفهوم تلفیق آب‌های سطحی و زیرزمینی، در محدوده رودخانه زاینده‌رود در حوضه قلعه‌شاهرخ مطابق معادله (۲) تنظیم شد.

$$\Delta S = Q_{in}^t + IGF^t + (P^t - AET^t - Inf^t) + BF^t - RF^t - Q_{out}^t \quad (2)$$

که در آن، P ، AET و Inf به ترتیب بارش، تبخیر-تعرق واقعی و نفوذ هستند. اختلاف بارش با مجموع نفوذ و تبخیر-تعرق، به محاسبه رواناب مستقیم منجر می‌شود.

لازم به ذکر است تبادلات آب در زیرزمین خود به دو بخش ناحیه ریشه (سطحی) و ناحیه آب زیرزمینی (عمیق) تقسیم شد. در حوضه قلعه شاهرخ چشمه‌هایی نیز وجود دارند که مهم‌ترین آنها چشمه دیمه با حجم سالانه حدود صد میلیون مترمکعب است. بررسی تفاوت ترکیب ایزوتوپی اکسیژن ۱۸ و دوتریوم چشمه دیمه با بارش منطقه و همچنین آزمایش ردیابی نشان داده است که همه یا قسمت اعظمی از آب چشمه، از بخش میانی پهنه زردکوه به‌ویژه بخش‌های زیرین آن (خارج از حوضه آبریز قلعه‌شاهرخ)، تأمین می‌شود (Gholami et al., 2020). به عبارتی انتقال طبیعی آب از زردکوه و پیوستن

مدل معتبر است و در مورد متغیرهای برون‌زا^۴ مقدار آن برابر صفر است. بنابراین هر چه مقدار این شاخص به یک نزدیکتر باشد، کارایی مدل بیشتر است (Chin, 1998).

$$R^2 = 1 - \frac{SSR}{SST} \quad (۳)$$

که در آن، SSR مجموع اختلاف مجذور بین مقادیر متغیر وابسته مشاهداتی و محاسباتی و SST کل تغییرات متغیر وابسته است و با جمع مجذور اختلافات بین هر مقدار متغیر وابسته مشاهداتی و میانگین همه مقادیر متغیر محاسباتی بیان می‌شود. ضریب کارایی نش - ساتکلیف نیز با معادله (۴) محاسبه می‌شود.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (۴)$$

که در آن، Q_o دبی مشاهداتی، Q_m دبی محاسباتی مدل، $\bar{Q}_o$ میانگین دبی‌های مشاهداتی و t زمان به ماه است. مقدار این ضریب در بازه $[-\infty, 1]$ تغییر می‌کند که هر چه به یک نزدیک‌تر شود، کارایی بالاتر مدل را تایید می‌کند. اگر مقادیر این ضریب بیشتر از ۰/۵ باشد نتایج رضایت‌بخش در نظر گرفته می‌شوند (Moriasi et al., 2007; Martinez and Gupta, 2010). علاوه بر این، برای تشخیص عملکرد مدل توسعه یافته بیلان رودخانه، ضریب KGE نیز استفاده شد (Gupta et al., 2009). KGE بر کاستی‌های ضریب کارایی نش-ساتکلیف غلبه می‌کند. محاسبه KGE به صورت معادله (۵) است.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2} \quad (۵)$$

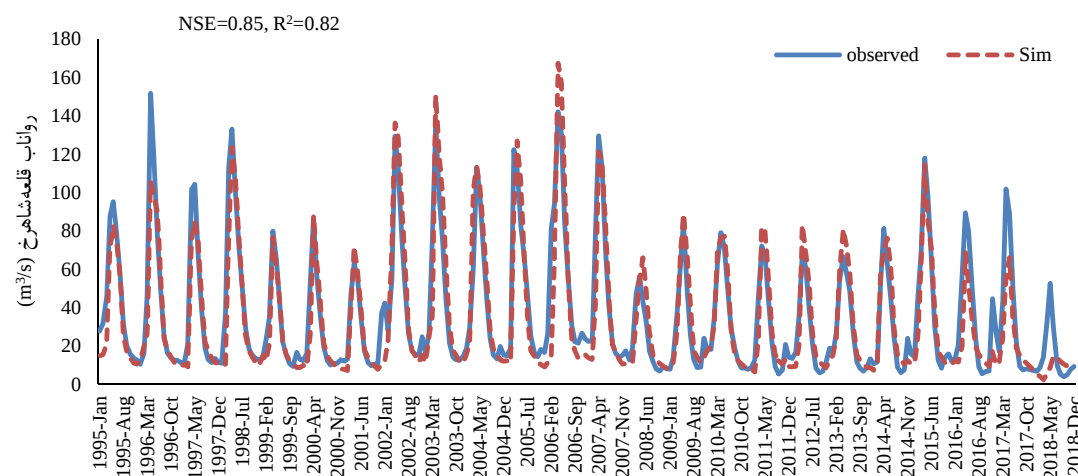
در این معادله، r ضریب همبستگی خطی پیرسون بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده است، σ_{sim} و σ_{obs} به ترتیب انحراف معیار مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی و μ_{sim} و μ_{obs} به ترتیب میانگین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی هستند. شاخص KGE مؤلفه‌های خطای مدل‌سازی (شامل مؤلفه‌های همبستگی، تغییرپذیری و سوگیری) را در نظر می‌گیرد (Santos et al., 2018). این ضریب، معیار قوی‌تر و قابل اعتمادتری برای مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی ارائه می‌دهد. معمولاً مقادیر $KGE > 0.6$ به عنوان عملکرد رضایت بخش مدل در نظر گرفته می‌شود (Knoben et al., 2019).

Q_{in} ، IGF، BF، RF و Q_{out} نیز به ترتیب نشان‌دهنده جریان ورودی به حوضه از تونل‌های اول و دوم کوهرنگ، جریان آب زیرزمینی بین حوضه‌ای^۱، دبی پایه، آب برگشتی و جریان خروجی از حوضه در زمان t (ماهانه) هستند. ΔS در این رابطه تغییر حجم است که باید کمینه شود. در معادله بیلان، مقادیر ورودی و خروجی حوضه که به صورت روزانه اندازه‌گیری می‌شوند به ماهانه تبدیل شد. مقدار بارش متوسط حوضه نیز از ایستگاه‌های باران‌سنجی با کمک مدل SWAT محاسبه شد. با توجه به الگوی کشت در سطوح کشاورزی، مقادیر مصرف از روش ضریب دوجزئی گیاهان برآورد گردید. همچنین درصدی از مصرف که از آب زیرزمینی تأمین می‌شود با توجه به سه دوره آماربرداری انجام شده توسط وزارت نیرو تخمین زده شد. مصارف دیگر نیز از جمله شرب، از داده‌های یاد شده استخراج شد. با توجه به عدم وجود اطلاعات کافی از آب زیرزمینی در این حوضه که به نام محدوده مطالعاتی چلگرد - قلعه‌شاهرخ با کد ۴۲۱۶ در شرکت مدیریت منابع آب ایران نام‌گذاری شده است، مقدار آب برگشتی از نتایج مطالعات آب‌های زیرزمینی که با مدل FEFLOW در بالادست سد زاینده‌رود انجام شده در نظر گرفته شد (Schätzl, 2024). چنانچه اشاره شد تعدادی از مؤلفه‌های بیلان از مدل SWAT و تعدادی به صورت داده‌های مشاهداتی وجود دارند، تنها مقداری از آب نفوذیافته به زمین که به جریان سطحی می‌پیوندد و به جریان پایه موسوم است، قابل اندازه‌گیری یا برآورد نیست. برای برآورد این مؤلفه از بیلان، با کمینه کردن خطا در مدل بیلان، این ضریب بهینه شد. نکته حائز اهمیت این است که در معادله بیلان از انتقال آب شرب شهرکرد از چشمه دیمه به واسطه عدم دسترسی به داده‌ها صرف‌نظر شد. در سال‌های اخیر به دلیل کاهش کیفیت چشمه دیمه در یک مقطع زمانی چند ماهه، انتقال آب متوقف و طرح بن-سامان از پائین‌دست سد زاینده‌رود به بهره‌برداری رسیده است. به این ترتیب با کمینه کردن تغییر حجم در معادله ۲، اجزاء بیلان طی دوره پژوهش به دست آمد. در نهایت با هدف ارزیابی کارایی مدل، از ضریب تبیین، ضریب کارایی نش - ساتکلیف و ضریب KGE استفاده شد. ضریب تبیین^۲ (R^2) (معادله ۳) تنها برای متغیرهای درون‌زای^۳

1- Inter-basin Groundwater Flow
2- Coefficient of Determination
3- Endogenous Variables

نتایج و بحث

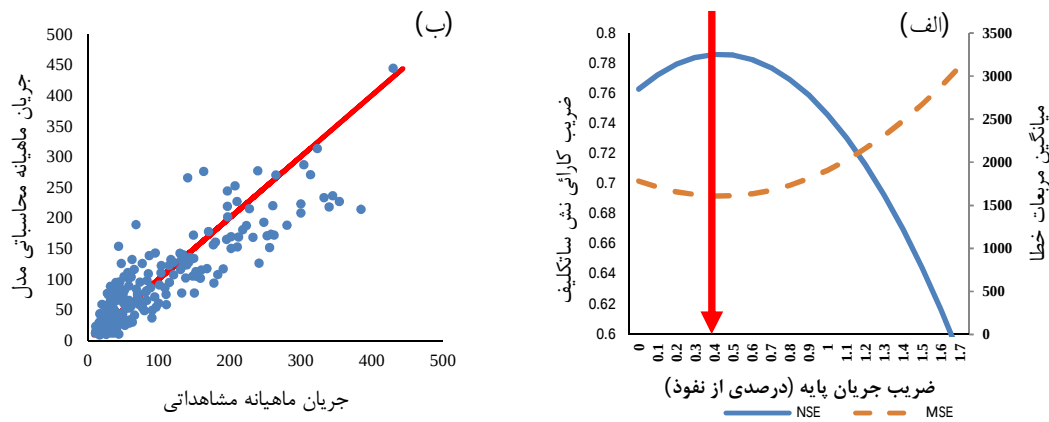
در پژوهش‌های قبلی در حوضه زاینده‌رود، نتایج مدل SWAT برای کل حوضه نشان داده است که بسیاری از ایستگاه‌ها به شدت تحت تأثیر کانال‌های انحراف آب، مخازن و سدها، چشمه‌ها، چاه‌های برداشت و انتقال آب بین حوضه‌ای قرار دارند (Faramarzi et al., 2017). به این ترتیب سعی شد کلیه موارد یاد شده در زیرحوضه قلعه شاهرخ در مدل SWAT در نظر گرفته شود. در این مدل، در مرحله تحلیل حساسیت تعداد زیادی پارامتر تأثیرگذار بر شبیه‌سازی شناسایی شد. تغییرات بعضی از این پارامترها شامل شماره منحنی، هدایت هیدرولیکی



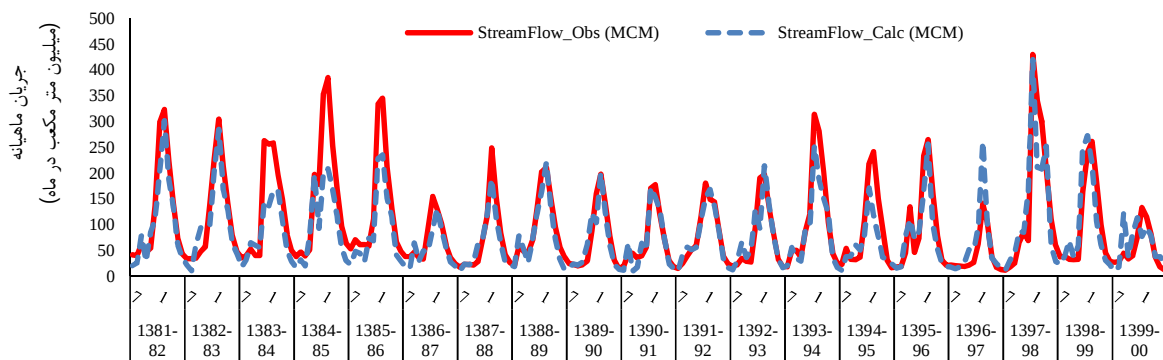
شکل ۵- مقایسه تغییرات ماهانه رواناب محاسباتی و مشاهداتی در حوضه قلعه شاهرخ (ایستگاه قلعه شاهرخ)

ساتکلیف نیز 0.79 به دست آمد. این ضریب حالتی استاندارد از تابع حداقل مربعات خطاها را نسبت به واریانس باقیمانده‌ها نشان می‌دهد و عدد بالاتر از 0.5 نشان‌دهنده قابل قبول بودن کارایی مدل در شبیه‌سازی است. در تحقیق حاضر مقدار ضریب KGE نیز 0.75 محاسبه شد. بنابراین می‌توان گفت که همه شاخص‌ها، کارایی قابل قبول مدل را تأیید می‌کنند. مقایسه بصری مقادیر ماهانه جریان محاسباتی و مشاهداتی در ایستگاه قلعه‌شاهرخ که خروجی حوضه قلعه شاهرخ و ورودی به مخزن سد زاینده‌رود است (شکل ۷) نیز کارایی مناسب مدل را نشان می‌دهد و بنابراین می‌توان اجزاء بیلان را تحلیل کرد.

محاسبه ضریب جریان پایه به عنوان درصدی از نفوذ با کمینه کردن میانگین مربعات خطا (MSE) و به دنبال آن حداکثر شدن ضریب کارایی نش- ساتکلیف در شکل ۶- الف نشان داده شده است. بر این اساس، 40% درصد از حجم نفوذ یافته به زمین، به صورت جریان پایه به آب سطحی باز می‌گردد. تکنیک واسنجی مدل بیلان نیز برای مقایسه میزان جریان خروجی حوضه در دو حالت محاسباتی و مشاهداتی با شاخص‌های مختلف انجام شد. منحنی پراکنش نقاط محاسباتی و مشاهداتی برای حجم خروجی از حوضه در هر ماه بر حسب میلیون مترمکعب در مراحل واسنجی مدل بیلان در شکل ۶- ب ارائه شد. نمودار پراکندگی داده‌ها بیانگر همبستگی بالا بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی است. ضریب کارایی نش-

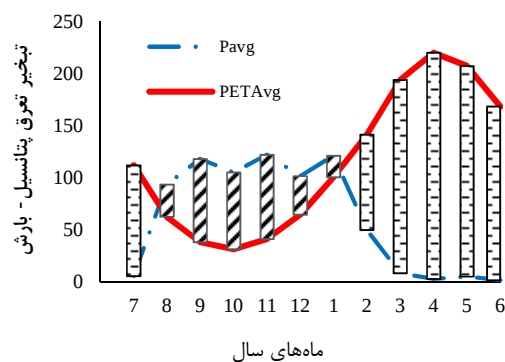


شکل ۶- (الف) بهینه‌سازی ضریب جریان پایه با کمینه کردن میانگین مربعات خطا و (ب) منحنی پراکنش نقاط مقادیر محاسباتی و مشاهداتی جریان ماهیانه بر حسب میلیون مترمکعب در ماه



شکل ۷- مقایسه سری زمانی ماهانه جریان خروجی مشاهده شده از حوضه و مقادیر محاسباتی مدل

۱۹۸۶ میلی‌متر و تبخیر- تعرق واقعی ۶۰۰ میلی‌متر محاسبه شد.

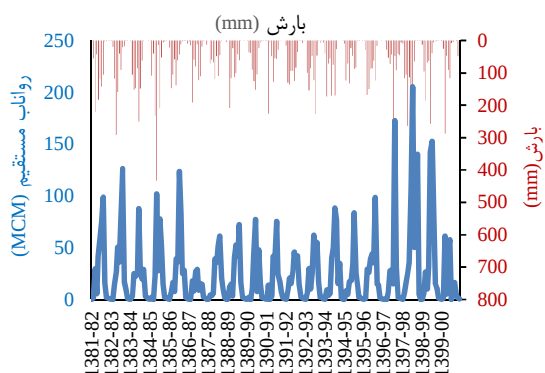


شکل ۸- تغییرات ماهیانه تبخیر- تعرق پتانسیل و بارش بر حسب میلی‌متر در حوضه قلعه شاهرخ

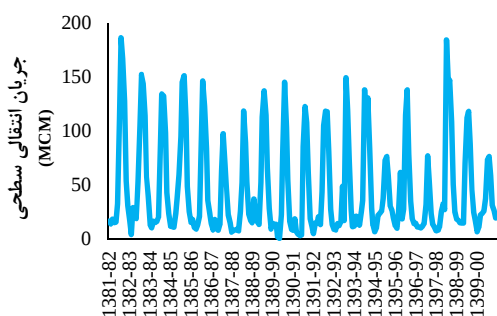
در حوضه قلعه شاهرخ حدود ۱۴۰۰ هکتار انواع کشت زراعی و باغی وجود دارد. الگوی کشت محصولات بر اساس آمار سال ۱۴۰۰، در جدول ۱ ارائه شده است.

در محدوده پژوهش و در دوره مورد مطالعه، کمترین بارش‌ها در شهریور و بیشترین بارش‌ها در بهمن‌ماه رخ داده است. تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) محاسبه‌شده به روش هارگریوز- سامانی با کمینه مقدار در دی‌ماه و بیشینه مقدار در تیرماه، نشان داد که یک همبستگی منفی بین بارش و PET وجود دارد. شکل ۸ تغییرات بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل را در حوضه قلعه شاهرخ نشان می‌دهد. به‌طوری که مشخص است طی ماه‌های آبان تا فروردین بارش بر PET فزونی می‌یابد، به عبارتی در این دوره، رطوبت خاک توسط بارش افزایش می‌یابد و برعکس در ماه‌های اردیبهشت تا شهریور مقدار بارش از PET کمتر است و از دست دادن رطوبت خاک اتفاق می‌افتد. در تحقیقات مختلف به روند معکوس بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل اشاره شده است (Zhang et al., 2013; Voudouris et al., 2007). مقدار بارش متوسط در دوره تحقیق ۱۰۶۰ میلی‌متر، تبخیر-تعرق پتانسیل

مترمکعب در سال ۹۷-۱۳۹۶ تا ۷۹۰ میلیون مترمکعب در سال ۸۲-۱۳۸۱ متغیر بوده است.



شکل ۹- تغییرات ماهیانه رواناب (میلیون مترمکعب در ماه) و بارش (میلی‌متر در ماه) در حوضه قلعه‌شاهرخ



شکل ۱۰- مجموع انتقال آب سطحی از طریق تونل‌های اول و دوم کوهرنگ

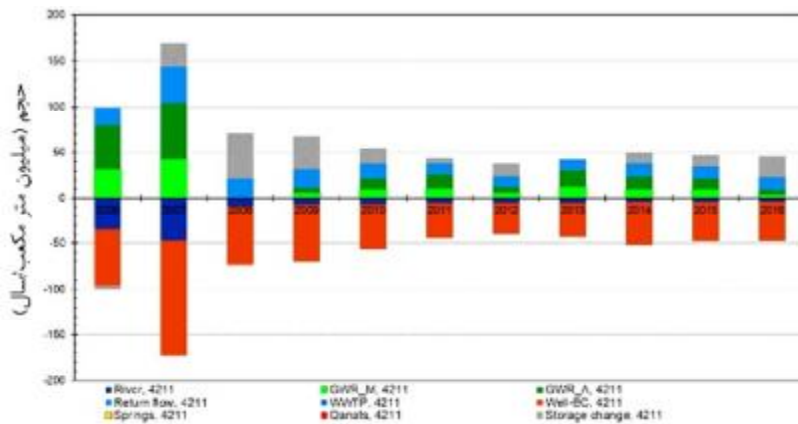
بررسی مقادیر برداشت از آب زیرزمینی در سه دوره آماربرداری، یک‌روند افزایشی برداشت را نشان می‌دهد که از حدود ۵ تا ۱۶ میلیون مترمکعب در سال تغییر می‌کند و به‌طور متوسط در دوره تحقیق میزان ۹ میلیون مترمکعب در سال از آب زیرزمینی برداشت شده است. مصارف حوضه به دلیل استفاده از فقط یک نقشه کاربری در کل دوره مطالعاتی، تغییرات معنی‌داری نداشته است. همچنین مصرف آب کشاورزی حوضه به‌طور متوسط حدود ۱۳۰ میلیون مترمکعب در سال تخمین زده شد. مقدار آب برگشتی در محدوده مطالعاتی مجاور حوضه (شکل ۱۱) به نام چادگان معادل ۳۰ درصد گزارش شده است (Schätzl, 2024). براین‌اساس در مطالعه حاضر نیز مقدار آب برگشتی ۳۰ درصد در نظر گرفته شد. آب برگشتی باتوجه‌به مدل بیلان آب، تغییراتی از حدود ۱۵ تا حدود ۴۳ میلیون مترمکعب در سال را نشان می‌دهد.

مصرف آب اراضی کشاورزی بر اساس الگوی کشت موجود به‌طور متوسط حدود ۱۳۰ میلیون مترمکعب در سال محاسبه شده که حدود ۷ درصد آن از آب‌های زیرزمینی و بقیه از آب‌های سطحی تأمین می‌شود. مقادیر بارش و رواناب ناشی از آن پس از تبدیل ماه‌های میلادی به شمسی و برای سال‌های آبی ۸۲-۱۳۸۱ تا ۰۰-۱۳۹۹ در شکل ۹ ارائه شده است. مدل SWAT نشان داد متوسط بارش سالانه طی دوره تحقیق از ۷۵۰ میلی‌متر تا ۱۵۹۴ میلی‌متر تغییر می‌کند. بارش متوسط درازمدت حوضه حدود ۱۰۶۰ میلی‌متر در سال برآورد می‌شود. همچنین تغییرات مقدار متوسط رواناب ناشی از بارش طی دوره یاد شده، از ۲۰۴ تا ۶۵۰ میلیون مترمکعب در سال است. متوسط درازمدت رواناب تولیدی نیز حدود ۲۹۴ میلیون مترمکعب در سال محاسبه شد.

جدول ۱- الگوی کشت در حوضه قلعه‌شاهرخ و سطح زیر کشت هر محصول (هکتار) بر اساس نوع آبیاری

الگوی کشت	سطح زیر کشت بر اساس نوع آبیاری (هکتار)			ترکیبی
	بارانی	سطحی	قطره‌ای	
گندم	۵۴۰/۴	۳۸۵۳/۹	۵/۴	۳۰/۸
یونجه	۲۵/۸	۳۵۹۸		۳۹/۱
علوفه		۲۲۸/۸		
جو		۱/۹		
سیب‌زمینی	۱۲۸۸/۳	۸/۵۴		۱۸/۱۵
ذرت	۸۴/۸	۴۴/۹		
صیفی‌جات	۳۰۲/۲	۴۹۳/۱	۲۰/۳	۳۰/۱
سایر محصولات زراعی	۱۳۱	۴۹/۲	۲۳/۶	
انگور		۷/۱۵		
گردو		۲۲۹/۷	۱۹/۸	۶/۲۸
بادام		۲۴۸/۷	۱۸۹۱/۵	۷/۶۴
صنوبر		۱۴۰		
سایر محصولات باغی		۴۴/۲	۳۵/۴	۲/۷۱
مجموع	۲۳۷۲/۵	۸۹۴۸	۱۹۹۶	۴۱۲/۴
جمع کل		۱۳۷۲۸.۹		

همان‌گونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده، مجموع جریان ورودی به حوضه از طریق دو تونل اول و دوم کوهرنگ نیز از یک میلیون مترمکعب در بهمن‌ماه ۱۳۸۹ تا بیشترین مقدار آن معادل ۱۸۶ میلیون مترمکعب در اردیبهشت ۱۳۸۲ تغییر کرده است. میزان جریان ورودی از خارج حوضه در مقیاس زمانی سالانه، بین ۲۸۷ میلیون

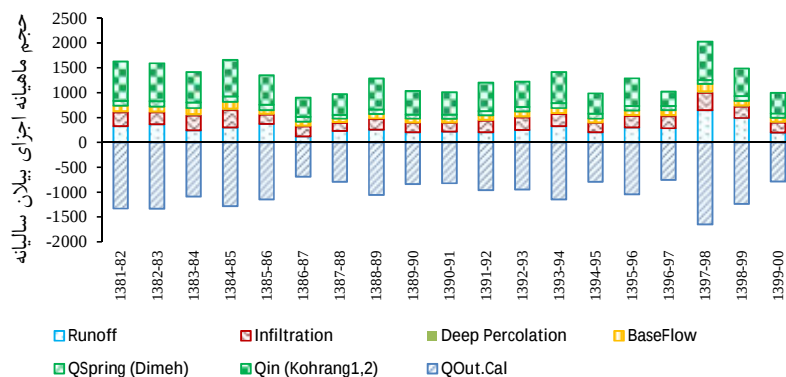


شکل ۱۱- بیلان منابع آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی چادگان با شناسه ۴۲۱۱ (منبع: Schätzl, 2024)

و جریان پایه از کل حجم خروجی حوضه ۳۷ درصد است. سهم آب انتقالی به حوضه از طریق تونل‌های اول و دوم کوهرنگ ۵۵۶ م.م.م است؛ لذا می‌توان گفت حدود ۵۴ درصد از خروجی سهم انتقال آب مصنوعی به حوضه است. سهم چشمه دیمه نیز با متوسط ۹۳ م.م.م از کل خروجی حوضه حدود ۹ درصد است. اعداد و درصدهای محاسباتی از سال ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۰ بسته به بارش سالانه تغییر کرده‌اند؛ به‌طوری‌که سهم انتقال مصنوعی به داخل حوضه توسط تونل‌های اول و دوم کوهرنگ از کل خروجی در دوره مطالعاتی بین ۳۹ تا ۶۵ درصد تغییر کرده است. تغییرات سهم مجموع رواناب مستقیم و جریان پایه از کل خروجی هم در سال‌های مختلف بین ۳۰ تا ۵۱ درصد بوده است.

شکل ۱۲ تغییرات اجزاء بیلان آب در حوضه قلعه‌شاهرخ را طی سال‌های مختلف (۱۳۸۱-۱۴۰۰) نشان می‌دهد. در این شکل ورودی‌ها به حوضه، مثبت و خروجی از حوضه منفی درج شده است.

بنابراین، می‌توان گفت به‌طور متوسط سالانه حدود ۲۸ میلیون مترمکعب به‌صورت آب برگشتی به جریان زیرزمینی پیوسته است. به‌منظور درک بهتر نقش اجزاء بیلان، احجام بر حسب میلیون مترمکعب در سال محاسبه شد و هر یک از مؤلفه‌ها در دوره مورد مطالعه به‌صورت سالانه در جدول ۲ گزارش شد. بیلان حوضه در یک برآورد درازمدت به‌صورت میانگین قابل تجزیه و تحلیل است. بخشی از بارش با حجم ۱۰۶۰ م.م.م (میلیون مترمکعب) به رواناب مستقیم با حجم ۲۹۴ م.م.م تبدیل شده است و در آبراهه‌ها جاری و به جریان اصلی رودخانه پیوسته است. از کل حجم بارش، مقدار ۲۲۳ م.م.م نفوذ و ۶۰۰ م.م.م به‌صورت تبخیر-تعرق از دسترس خارج شده است. به عبارتی حدود ۲۸ درصد بارش به رواناب تبدیل می‌شود و ۲۲ درصد بارش در زمین نفوذ می‌کند. بدیهی است مابقی بارش به‌صورت تلفات از دسترس خارج می‌گردد. از حجم نفوذ کرده به خاک حدود ۹۳ م.م.م به‌صورت جریان پایه به آب سطحی برمی‌گردد. همچنین می‌توان گفت سهم مجموع رواناب مستقیم ناشی از بارش



شکل ۱۲- تغییرات اجزاء بیلان آب در حوضه قلعه‌شاهرخ بر حسب میلیون مترمکعب در سال

جدول ۲- تغییرات حجمی اجزاء بیلان در دوره مورد مطالعه (۱۴۰۰-۱۳۸۱) بر حسب میلیون مترمکعب در سال

سال آبی	بارش	تبخیر- تعرق پتانسیل	تبخیر- تعرق واقعی	رواناب مستقیم	نفوذ عمیق	جریان پایه	چشمه دیمه	جریان ورودی از تونل‌ها	جریان خروجی محاسباتی	جریان خروجی مشاهداتی
۸۲-۱۳۸۱	۱۲۵۰	۱۸۹۴	۶۵۹	۳۳۱	۲۷۵	۱۱۰	۹۷	۷۹۰	۱۳۲۸	۱۴۷۸
۸۳-۱۳۸۲	۱۰۸۴	۱۸۶۹	۵۹۳	۳۶۶	۲۳۹	۹۵	۱۰۹	۷۶۲	۱۳۳۳	۱۳۵۴
۸۴-۱۳۸۳	۱۳۶۲	۱۸۶۹	۸۵۴	۲۴۲	۳۰۰	۱۲۰	۱۱۶	۶۱۲	۱۰۹۰	۱۴۵۳
۸۵-۱۳۸۴	۱۵۷۵	۱۹۰۰	۹۴۹	۳۰۳	۳۴۷	۱۳۹	۱۱۰	۷۳۲	۱۲۸۳	۱۸۶۸
۸۶-۱۳۸۵	۸۵۵	۱۷۹۹	۴۹۷	۳۶۹	۱۸۸	۷۵	۱۰۸	۵۹۷	۱۱۴۹	۱۵۴۶
۸۷-۱۳۸۶	۸۹۳	۱۹۴۰	۵۹۰	۱۲۵	۱۹۶	۷۹	۹۶	۳۸۸	۶۸۷	۷۸۲
۸۸-۱۳۸۷	۷۵۰	۱۸۷۸	۳۹۵	۲۳۳	۱۶۵	۶۶	۷۱	۴۲۰	۷۸۹	۸۴۸
۸۹-۱۳۸۸	۹۵۱	۱۹۶۴	۵۰۸	۲۵۷	۲۰۹	۸۴	۹۲	۶۲۴	۱۰۵۸	۱۱۲۱
۹۰-۱۳۸۹	۸۲۹	۱۹۷۷	۴۷۲	۲۰۷	۱۸۲	۷۳	۸۳	۴۷۷	۸۳۹	۸۲۳
۹۱-۱۳۹۰	۷۸۲	۱۹۳۶	۴۲۸	۲۲۰	۱۷۲	۶۹	۸۲	۴۵۴	۸۲۴	۸۲۰
۹۲-۱۳۹۱	۱۰۳۲	۱۹۷۹	۶۱۵	۲۱۰	۲۲۷	۹۱	۸۰	۵۷۸	۹۵۹	۹۲۴
۹۳-۱۳۹۲	۱۱۳۹	۱۹۴۳	۶۵۸	۲۵۲	۲۵۱	۱۰۰	۹۰	۵۰۸	۹۵۰	۸۷۸
۹۴-۱۳۹۳	۱۱۱۸	۱۹۸۵	۶۴۵	۳۲۶	۲۴۶	۹۸	۱۰۲	۶۲۲	۱۱۴۸	۱۳۲۸
۹۵-۱۳۹۴	۸۲۳	۲۱۱۸	۴۵۰	۲۱۰	۱۸۱	۷۲	۹۷*	۴۱۴	۷۹۳	۱۰۳۰
۹۶-۱۳۹۵	۱۰۴۰	۲۱۷۲	۵۲۳	۳۰۳	۲۲۹	۹۲	۹۲*	۵۵۶	۱۰۴۳	۱۱۱۸
۹۷-۱۳۹۶	۱۱۱۵	۲۱۸۱	۷۰۳	۲۸۵	۲۴۵	۹۸	۸۵*	۲۸۷	۷۵۵	۴۹۷
۹۸-۱۳۹۷	۱۵۹۴	۲۰۷۵	۷۹۶	۶۵۰	۳۵۱	۱۴۰	۸۱*	۷۷۸	۱۶۴۹	۱۷۱۸
۹۹-۱۳۹۸	۱۰۴۸	۲۰۵۲	۵۴۶	۴۹۴	۲۳۱	۹۲	۹۳*	۵۵۷	۱۲۳۶	۱۱۹۱
۰۰-۱۳۹۹	۹۰۱	۲۲۰۵	۵۲۴	۲۰۵	۱۹۸	۷۹	۸۵*	۴۱۴	۷۸۲	۶۴۱
میانگین	۱۰۶۰	۱۹۸۶	۶۰۰	۲۹۴	۲۳۳	۹۳	۹۳	۵۵۶	۱۰۳۷	۱۱۲۷

* به دلیل عدم دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری، مقادیر برآورد شده استفاده شد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، بیلان آب در مهم‌ترین زیرحوضه زاینده‌رود به نام قلعه‌شاهرخ به‌عنوان معیاری برای ارزیابی وضعیت منابع آبی و تأثیر فعالیت‌های انسانی و طبیعی (نظیر انتقال آب طبیعی) بررسی شد. بدین منظور، از مدل ارزیابی آب‌و خاک (SWAT) برای تخمین رواناب مستقیم ناشی از بارش استفاده شد. علاوه‌بر آن، مدل یاد شده مقادیر نفوذ و تبخیر- تعرق واقعی را نیز محاسبه نمود. مقایسه مقادیر محاسباتی توسط SWAT با مقادیر مشاهداتی متناظر، حاکی از عملکرد قابل‌قبول این مدل در تخمین جریان خروجی حوضه بود. در ادامه مدل مفهومی بیلان آب جریان سطحی با توجه به همه اجزاء، شامل جریان‌های انتقالی سطحی مصنوعی، جریان خروجی چشمه با منشأ فراحوضه‌ای، برداشت از آب زیرزمینی توسط چاه‌ها و قنوات، تبادل آب سطحی و زیرزمینی و مصارف حوضه ایجاد شد. در یک دوره آماری ۲۰ ساله منتهی به سال ۱۴۰۰ شمسی، تعادل ورودی‌ها و خروجی‌ها به‌صورت ماهیانه برقرار شد. مقدار جریان پایه با کمینه‌کردن میانگین مربعات خطا به‌دست آمد و کارایی

مدل بیلان ماهیانه با ضریب نش-ساتکلیف ۰/۷۹، ضریب KGE معادل ۰/۷۵ و ضریب تبیین ۰/۸۲ تأیید شد. نوسانات شدید بارش متوسط سالانه در حوضه و تغییرات آن از ۷۵۰ میلی‌متر تا حدود ۱۶۰۰ میلی‌متر نشان‌دهنده آن است که بیلان آب حوضه قلعه شاهرخ تحت‌تأثیر نوسانات اقلیمی و همچنین پروژه‌های انتقال آب قرار دارد. نتایج مدل بیلان نشان داد که حدود ۲۸ درصد از کل بارش به رواناب مستقیم، ۲۲ درصد آن نفوذ و مابقی به‌صورت تبخیر- تعرق از دسترس خارج شده است. همچنین می‌توان سهم جریان خروجی حوضه را از مؤلفه‌های مختلف بیلان به‌صورت میانگین درازمدت سالانه بیان کرد. نتایج نشان داد که ۵۴ درصد خروجی مربوط به انتقال آب سطحی تونل‌های اول و دوم کوهرنگ، ۹ درصد مربوط به چشمه دیمه، ۲۸ درصد رواناب مستقیم ناشی از بارش و ۹ درصد جریان‌های جانبی زیرسطحی است که جریان پایه رودخانه را تشکیل می‌دهند. از آنجایی که سهم آب انتقالی به حوضه قابل‌توجه است، توجه کافی به زیرحوضه کوهرنگ هم از نظر کمی و هم از نظر حفاظت کیفی اهمیت ویژه‌ای دارد.

- research/Lawrence Erlbaum Associates. <https://doi.org/10.4324/9781410604385-10>
6. Falalakis G. and Gemitzi A. 2020. A simple method for water balance estimation based on the empirical method and remotely sensed evapotranspiration estimates. *Journal of Hydroinformatics*, 22(2): 440-451. <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.182>
 7. Faramarzi M. Besalatpour A. A. and Kaltofen M. 2017. Application of the hydrological model SWAT in the Zayandeh Rud catchment. Reviving the Dying Giant: Integrated Water Resource Management in the Zayandeh Rud Catchment, Iran, pp. 219-240. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54922-4_14
 8. Gholami E. Saba A. A. Yassaghi A. Khatib M. M. and Karimi H. 2020. Evaluation of transverse fault performance in inter-basin water transport using isotopic and color tracking studies, case study: Dimeh spring, Koohrang. *Adv. Appl. Geol.* 10(2): 284-293. (In Persian). <https://doi.org/10.22055/AAG.2020.30984.2038>
 9. Gupta H. V. Kling H. Yilmaz K. K. and Martinez G. F. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1-2): 80-91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
 10. Javadinejad S. 2016. Vulnerability of water resources to climate change and human impact: scenario analysis of the Zayandeh Rud river basin in Iran (Doctoral dissertation, University of Birmingham).
 11. Knoben W. J. Freer J. E. and Woods R. A. 2019. Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10): 4323-4331. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>
 12. Martinez G. F. and Gupta H. V. 2010. Toward improved identification of hydrological models: A diagnostic evaluation of the “abcd” monthly water balance model for the conterminous United States. *Water Resources Research*, 46(8). <https://doi.org/10.1029/2009WR008294>
 13. Mistry B. Shrimali N. and Shastri H. 2023. Estimation of Surface-Subsurface Water Balance in Lower Tapi River Basin Using Gridded Data and Station-Based Observed Data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 29(sup1), pp.365-375. <https://doi.org/10.1080/09715010.2023.2201962>
 14. Moriasi D. N. Arnold J. G. Van Liew M. W. Bingner R. L. Harmel R. D. and Veith T. L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3): 885-900. doi: 10.13031/2013.23153.

همچنین حفاظت از حریم تغذیه چشمه دیمه ضروری است. تغییر در بارش، دمای هوا، ذوب برف و همچنین فعالیت‌های انسانی نظیر تغییر کاربری اراضی در حوضه کوهرنگ و حریم تغذیه چشمه دیمه می‌تواند به مقدار زیادی بر کمیت و کیفیت آب ورودی به مخزن سد زاینده‌رود اثرگذار باشد. در انتها پیشنهاد می‌شود بررسی‌های تکمیلی برای شناخت هیدرولوژیکی، پایش و مدیریت فرایند انتقال آب بین حوضه‌ای به صورت طبیعی و مصنوعی و درک تأثیرات آن، انجام شود تا از سلامت زیستگاه‌های محلی و تأمین آب در آینده اطمینان حاصل شود.

سپاس‌گزاری

نویسندگان از سازمان هواشناسی و وزارت نیرو به خاطر در اختیار قرار دادن داده و اطلاعات و از دانشگاه شهرکرد که موجبات تسهیل انجام این تحقیق را فراهم نموده‌اند، تشکر می‌نمایند.

منابع

1. Ababei B. and Sohrabi T. 2009. Assessing the performance of SWAT model in Zayandeh Rud watershed. *Water and Soil Conservation*. 16(3): 41-58. (In Persian) <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222069.1388.16.3.3.7>
2. Ahmadi A. Jalali J. and Mohammadpour A. 2022. Future runoff assessment under climate change and land-cover alteration scenarios: a case study of the Zayandeh-Roud dam upstream watershed. *Hydrology Research*, 53(11): 1372-1392. <https://doi.org/10.2166/nh.2022.056>
3. Besalatpour A. A. Heydarpour G. H. Kazemi A. and Afshar A. H. A. 2020. Hydrological modeling of spatial and temporal changes of blue and green water resources in the Zayandeh Rud river basin. Standing up to Climate Change: Creating Prospects for a Sustainable Future in Rural Iran, pp.141-173. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50684-1_7
4. Boughton W. 2004. The Australian water balance model. *Environmental Modelling & Software*, 19(10): 943-956. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.10.007>
5. Chin W. W. 1998. The partial least squares approach to structural equation modeling. *Modern methods for business*

15. Ridder, N. D. and Boonstra J. 1994. Analysis of water balances, International Institute for Land Reclamation and Improvement. 601-633. Wageningen. Netherlands. 978-90-70754-33-4. No. Ed. 2, 601-633 ref. 11.
16. Saedpanah M. Reisi M. and Ahmadi Nadoushan M. 2021. The effect of land use changes on water quality (Case study: Zayandeh-Rud Basin, Isfahan, Iran). *Pollution*, 7(4): 895-904. <https://doi.org/10.22059/poll.2021.324387.1100>
17. Santos L. Thirel G. and Perrin C. 2018. Pitfalls in using log-transformed flows within the KGE criterion. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(8): 4583-4591. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4583-2018>, 201
18. Schätzl P. 2024. Groundwater Models Zayandeh Rud, Federal Ministry of Education and Research
19. Shen Y. and Chen Y. 2010. Global perspective on hydrology, water balance, and water resources management in arid basins. *Hydrological Processes: An International Journal*, 24(2): 129-135. <https://doi.org/10.1002/hyp.7428>
20. Viney N. Vaze J. Crosbie R. Wang B. Dawes W. and Frost A. 2014. AWRA-L v4. 5: technical description of model algorithms and inputs.
21. Voudouris K. Mavrommatis T. and Antonakos A. 2007. Hydrologic balance estimation using GIS in Korinthia prefecture, Greece. *Advances in Science and Research*, 1(1): 1-8. <https://doi.org/10.5194/asr-1-1-2007>
22. Zhang J. Ding Z. Yuan W. and Zuo Q. 2013. Research on the relationship between rainfall and reference crop evapotranspiration with multi-time scales. *Paddy and Water Environment*, 11: 473-482. <https://doi.org/10.1007/s10333-012-0338-y>
23. Ziaei L. 2020. Zayandeh Rud River basin: A region of economic and social relevance in the central plateau of Iran. Standing up to climate change: Creating prospects for a sustainable future in Rural Iran, pp. 91-105. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50684-1_5