نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۹، آذر - دی ۱۴۰۴، ص. ۸۵۵-۸۴۱

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 5, Vol. 19, Dec.-Jan. 2026, p. 841-855

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی کارایی مدل پویایی سیستم در عملکرد مخزن سد زنوز با در نظر گرفتن سناریوهای تغییر اقلیم

رقیه قاسم‌پور[1*]، محمدتقی اعلمی[2]، سید مهدی ثاقبیان[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸

چکیده

در این مطالعه اثرات سناریوهای تغییر اقلیم با در نظر گرفتن شاخص‌های قابلیت اطمینان، آسیب‌پذیری، تاب‌آوری، پایداری و کمبود برای سد زنوز بررسی شده است. کوچک مقیاس‌سازی برای سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ با استفاده از مدل گردش عمومی جو CanESM2 بر اساس سناریوهای مختلف اقلیمی و با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب (FA) انجام شد. از مدل IHACRES برای شبیه‌سازی جریان ورودی به سد استفاده شد. همچنین، مدل جریان-ذخیره با استفاده از نرم‌افزار Vensim ایجاد شد. نتایج نشان داد که جریان ورودی به ترتیب ۱۲، ۳۰ و ۳۲ درصد در سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 کاهش می‌یابد. بهینه‌سازی الگوی کشت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در صورت اعمال الگوی کشت بهینه در سناریوهای مختلف اقلیمی، تأمین آب به ترتیب در ۱۰، ۴ و ۴ سال آینده دشوار نخواهد بود، اما پس از آن، کمبود آب به‌تدریج ظاهر می‌شود. یافته‌ها نشان داد که اگرچه اجرای الگوی کشت بهینه پنج شاخص را در تمام بخش‌های مصرف آب بهبود می‌بخشد، اما مخزن سد قادر به پاسخگویی به تقاضاها در آینده نخواهد بود. بنابراین، اتخاذ سیاست‌ها و روش‌های عملی برای مدیریت منابع آب در تمام بخش‌ها ضروری است.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، پویایی سیستم، تغییر اقلیم، کرم شب‌تاب، Vensim

مقدمه

برنامه‌ریزان منابع آب، نگرانی‌هایی را در مورد تدوین یک برنامه جامع برای یک استراتژی موفق جهت مقابله با کمبود آب و برآوردن نیازهای خاص ناشی از تغییرات اقلیمی در آینده مطرح می‌کنند (فتوکیان و همکاران، ۱۳۹۶). تغییرات اقلیمی می‌تواند بر دمای هوا، بارندگی، رواناب و تقاضای آب در بخش‌های خانگی، صنعتی و کشاورزی تأثیر بگذارد. این تغییرات باید در برنامه‌ریزی منابع آب در نظر گرفته شوند تا نیازها و انتظارات آینده جامعه بهتر برآورده شود. بنابراین، تغییرات اقلیمی می‌تواند عامل تعیین‌کننده‌ای در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب باشد. بسیاری از محققان اثرات تغییرات اقلیمی را بر سیستم‌های منابع آب ارزیابی کرده‌اند. مطالعات اخیر گزارش می‌دهند که در آینده شاهد تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب خواهیم بود. طبق تحقیقات، تغییرات اقلیمی باعث کاهش دبی رودخانه‌ها و شاخص پایداری سیستم خواهد شد (Ahmadi et al., 2015; Hakami-Kermani et al., 2020). پیش‌بینی می‌شود که تغییرات اقلیمی باعث افزایش تقاضای آب کشاورزی و کاهش قابلیت اطمینان سیستم شود (Ehteram et al., 2018; Salman et al., 2020). با توجه به تغییرات اجتناب‌ناپذیر، ساخت بیشتر سدها و افزایش ظرفیت مخازن می‌تواند راه‌حلی برای تأمین پایدار آب باشد (Chen et al., 2016). ترینهام و همکاران، ظرفیت سیستم تأمین آب منطقه‌ای پوجت ساوند را برای تأمین نیازهای آینده در رابطه با تغییرات اقلیمی و رشد جمعیت در یک افق ۷۵ ساله بررسی کردند (Traynham et al., 2011). یافته‌های آن‌ها نشان داد که تغییرات اقلیمی عملکرد سیستم را در آینده کاهش می‌دهد، بنابراین سیاست‌های عملیاتی برای تأمین نیازهای آینده ضروری است. بنابراین، بررسی و ارزیابی مجدد سیاست‌های رویه عملکرد مخزن در زمینه تغییرات اقلیمی و سناریوهای مختلف سازگاری می‌تواند اطلاعات مفیدی را برای

۱- فارغ التحصیل دکتری گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۲- استاد گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۳- استادیار گروه عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر- ایران
(*- ایمیل نویسنده مسئول: r.ghasempour@tabrizu.ac.ir)

تصمیم‌گیرندگان فراهم کند تا اثرات منفی تغییرات اقلیمی بر قابلیت اطمینان منابع آب را کاهش دهند (Ranzani et al., 2018; Lee and Shin, 2021). علاوه بر این، مدیریت تقاضای آب، کمبود آب را در سطح قابل قبولی نگه می‌دارد و می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی پایدار برای مدیریت منابع آب و وسیله‌ای برای حفظ رشد اقتصادی و وضعیت اکولوژیکی در نظر گرفته شود. بخش کشاورزی یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان آب است، به این معنی که کاهش هر اندازه‌ای در تقاضای آب این بخش، مناسب‌ترین راه برای کاهش آسیب‌پذیری آن است (Wu et al., 2013; Zarghami et al. 2016). بنابراین، بهبود راندمان آبیاری و کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی بهترین راه برای کاهش کمبودها است. بهینه‌سازی الگوی کشت به‌عنوان راه‌حلی برای مسئله مصرف بالای آب، قابلیت اطمینان سیستم را افزایش داده و آسیب‌پذیری منابع آب را کاهش می‌دهد (Zamani et al., 2017).

با توجه به نقش آب به‌عنوان یک عنصر اساسی در توسعه اقتصادی کشور، کنترل و بهینه‌سازی استفاده از منابع آب موجود از اهمیت بالایی برخوردار است. ازآنجایی‌که احداث تأسیسات آبی مستلزم هزینه‌های بالایی است، بی‌توجهی به بهره‌برداری صحیح از زمین نه‌تنها سود مورد انتظار از ایجاد تأسیسات را تضمین نمی‌کند، بلکه در مقیاس بزرگ، باعث از دست رفتن سرمایه اولیه و تخریب محیط‌زیست نیز می‌شود. فقدان نگرش سیستمی در پروژه‌های توسعه منابع آب در حوضه‌های آبی کشور و تخصیص طرح‌های توسعه منابع آب به‌صورت مجزا و نقطه به نقطه، بدون توجه به تعاملات پروژه‌های توسعه منابع آب در یک حوضه، باعث ایجاد چالش‌های بزرگ در حوضه‌ها و هدر رفتن گنجینه‌های ملی خواهد شد. مشکلات ناشی از رشد و توسعه جمعیت در نحوه تخصیص منابع آب روز به روز پیچیده‌تر می‌شود و یافتن راه‌حل مناسب نیازمند تفکر بهتری است. منابع آب موجود در سراسر جهان به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند و رشد جمعیت و تغییرات اقلیمی، تنش‌هایی را بر این منابع حیاتی تحمیل می‌کند (Jackson et al., 2001; Baron et al., 2002). برای کنار هم قرار دادن این اجزای پیچیده و مرتبط و تعامل با آن‌ها و اندیشیدن به راه‌هایی برای مدیریت منابع آب، لازم است روش‌هایی توسعه یابد که علاوه بر تجزیه‌وتحلیل سیستم، بتوانند سیستم را به‌گونه‌ای شبیه‌سازی کنند که ایده‌ای تقریبی ازآنچه واقعاً اتفاق افتاده یا خواهد افتاد، ارائه دهد. علم دینامیک سیستم (SD) این امر را ممکن می‌سازد. مدل‌سازی تغییر منابع آب در طول زمان به‌صورت پویا، مبنای علمی معتبری را برای استراتژی‌های مدیریت آب فراهم می‌کند (Wins, 2009). روش‌های دینامیک سیستم در مقایسه با سایر روش‌های تحلیل سیستم، ساده و مؤثر هستند و نیازی به ریاضیات پیچیده در توصیف سیستم ندارند. جذابیت این روش، افزایش سرعت ایجاد مدل، امکان توسعه گروهی مدل‌ها و قابلیت اصلاح آسان مدل در پاسخ به تغییرات در سیستم است (Simonovic and Ahmad, 2002). همچنین، در این رویکرد، اعتبار مدل را می‌توان با روش‌های مختلفی مانند تحلیل حساسیت و آزمون‌های خطی سنجید. تحلیل دینامیک سیستم به‌عنوان روشی مبتنی بر تفکر سیستمی برای مطالعه و بهبود یادگیری در رابطه با سیستم‌های پیچیده استفاده می‌شود. هدف از این روش، درک ماهیت یک رویداد پویا و تلاش برای اجرای سیاست‌ها و مدیریت آن رویداد است. این روش با در نظر گرفتن روابط بین اجزای آن، رفتار سیستم را پیش‌بینی می‌کند. این الگوها راهی برای درک رفتار سیستم‌های پیچیده در طول زمان هستند. آنچه پویایی‌شناسی سیستم را از سایر روش‌ها متمایز می‌کند، استفاده از حلقه‌های بازخورد و متغیرهای نرخ و حالت است که به درک رفتار سیستم کمک می‌کند. اساس این روش، شناخت ساختار سیستم (روابط غیرخطی، تأخیرها و بازخوردها) در تعیین رفتار سیستم ازنظر شناخت هر جزء است (Forrester, 2007).

فتوکیان و همکاران (۱۳۹۶) در تحقیقی به بررسی بهره‌برداری از مخزن سد یامچی با استفاده از مدل پویایی سیستم‌ها در محیط نرم‌افزار Vensim پرداختند. عملکرد سد، با اعمال سیاست مدیریتی الگوی کشت بهینه در مدل پویایی سیستم سد یامچی و بر اساس سه شاخص آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری و اطمینان‌پذیری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با اعمال سیاست الگوی بهینه کشت پیشنهادی، می‌توان کمبود آب را در مقایسه با روند بهره‌برداری کنونی در حدود ۴۳ درصد کاهش داد. شاهرخی ساردو و جلال کمالی (۱۴۰۰) با به‌کارگیری مدل پویایی سیستم به بررسی پارامترهای مؤثر در ذخایر آب زیرزمینی به‌عنوان راه‌حلی مؤثر در حفظ و تقویت تراز سطح آب زیرزمینی در دشت نسا بم پرداختند. برای ارزیابی نتایج سناریوهای مدیریتی ارائه‌شده، بارش پیش‌بینی‌شده توسط مدل گردش عمومی جو GFDL-ESM2M تحت سناریوی RCP4.5 برای دوره زمانی آینده نزدیک۲۰ سال، با یک مدل ARMAX به رواناب تبدیل شد. نتایج نشان داد که پخش حدود ۶۰ درصد آب مازاد سد نسا بر اساس برنامه بهره‌برداری از مخزن، در بیست سال به کاهش روند افت تراز آب زیرزمینی منطقه منجر می‌شود.

از طرف دیگر امروزه شبکه‌های غیرخطی به‌عنوان یکی از سیستم‌های هوشمند در مدل‌سازی سیستم‌های گردش آبی که دارای ماهیت غیرخطی و ویژگی‌های متغیر زمانی و مکانی می‌باشند مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روش‌ها اکثراً الهام گرفته از پدیده‌های موجود در طبیعت هستند و می‌توانند برای پیش‌بینی هرگونه متغیری که در آن: رابطه بین متغیرهای مربوطه به‌خوبی درک نمی‌شود، پیدا کردن اندازه و شکل راه حل نهایی دشوار است، و روش‌های تحلیلی ریاضی رایج قادر به حل آن ها نبوده و یا بسیار زمان‌بر هستند، استفاده شوند. به‌عنوان ابزاری توانمند در حل مسائل پیچیده به شمار می‌آیند و معمولاً دارای جواب بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک هستند

(روشنگر و همکاران، ۱۳۹۹). به‌عنوان مثال، الگوریتم کرم شب‌تاب یک تکنیک فرا ابتکاری است که با الهام از رفتارهای ساطع کردن نورهای شب‌تاب به‌دست آمده است. هدف اولیه کرم شب‌تاب از ساطع نمودن نور برای جذب سایر همنوعان است. تحقیقات نشان داده است که این الگوریتم در مقایسه با پرواز پرندگان و ژنتیک برای پیدا کردن نقاط بهینه عمومی در برخی از کاربردهای مهندسی کارایی بیشتری دارد. الگوریتم کرم شب‌تاب با انعطاف‌پذیری و توانایی در گریز از نقاط بهینه‌ی محلی یکی از ابزارهای ارزشمند در حل مسائل بهینه‌سازی مدرن است. استفاده از آن در مدیریت منابع آب و کشاورزی می‌تواند کمک شایانی به تصمیم‌گیری پایدار و علمی داشته باشد. اهمیت الگوریتم کرم شب‌تاب شامل: توانایی بالا در جستجوی فضای وسیع جواب، سادگی در پیاده‌سازی و کارایی در مسائل غیرخطی، ناپیوسته و دارای محدودیت است. بسیاری از الگوریتم‌های کلاسیک در حل چنین مسائلی ناتوان هستند، اما الگوریتم کرم شب‌تاب می‌تواند جواب‌های قابل قبولی ارائه دهد

در این مطالعه، از رویکرد پویایی سیستم برای شبیه‌سازی منابع آب حوضه آبریز زنوزچای و ارائه سناریوهای مختلف برای تخصیص بهینه منابع آب سد زنوز استفاده شده است. سد زنوز در استان آذربایجان شرقی و در نزدیکی شهر زنوز از توابع شهرستان مرند واقع شده است. کاربری این سد تأمین آب کشاورزی، شرب و کنترل سیلاب است. تأمین آب برای باغات و مزارع زنوز و مناطق اطراف، کمک به توسعه کشاورزی در منطقه نیمه‌خشک، جلوگیری از سیلاب‌ها در فصل بارندگی و نقش در تثبیت جمعیت روستایی از طریق تأمین آب پایدار از اهداف احداث سد زنوز می‌باشند. بنابراین، سد زنوز یک سازه حیاتی در استان آذربایجان شرقی بوده و بررسی عملکرد مخزن آن ضروری می‌باشد. عملکرد سد در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از مدل گردش عمومی جو و روش کرم شب‌تاب ارزیابی شده و تأثیرات الگوی کشت بهینه (OCP) بر بهبود عملکرد سد ارزیابی گردیده است.

مواد و روش‌ها

موقعیت و ویژگی‌های منطقه موردمطالعه

سد زنوز در حوضه رودخانه ارس، در شمال‌غرب ایران واقع شده است. حوضه رودخانه ارس، حوضه‌ای است که کشورهای آذربایجان و ارمنستان را با کشورهای شمالی هم‌مرز می‌کند و با ترکیه مرز مشترک دارد. آب‌وهوای این حوضه عمدتاً تحت تأثیر جبهه قطبی و توده‌های هوای معتدل مدیترانه‌ای است. مطابق با شکل ۱، سد زنوز در ۲۴ کیلومتری شمال شهر مرند و ۱۰۰ کیلومتری شمال‌غرب شهر تبریز واقع شده است. رودخانه زنوز از ارتفاعات سلطان زنجیر (سلطان سنجر) و از کوه‌های داغدی، غزل داغی، اوداغی و بوغوداغی سرچشمه می‌گیرد و در جهت شرقی-غربی جریان دارد. این رودخانه پس از عبور از شهر زنوز و پیوستن به رودخانه قطور، از طریق رودخانه ارس به دریای خزر می‌ریزد. مساحت حوضه زنوز حدود ۴۵/۳ کیلومترمربع و میانگین دبی سالانه آن ۱۱ میلیون مترمکعب است. میانگین بارندگی و تبخیر سالانه از سطح آزاد آب در محل سد به ترتیب ۳۸۶ میلی‌متر و ۹۲۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. آب موردنیاز زمین‌های کشاورزی و باغ‌های مرند و زنوز از سد زنوز در قالب شبکه آبیاری مدرن و زهکشی سنتی تأمین می‌شود. تأمین نیاز آبیاری توسط این سد، به‌ویژه در دوره‌های خشک‌سالی، توانسته است معیشت کشاورزان منطقه را به‌خوبی حفظ کند. داده‌های دبی و بارندگی رودخانه در بازه زمانی ۱۳۵۳ تا ۱۳۹۵ از شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی و سازمان هواشناسی دریافت شد. داده‌های مربوط به کشت زمین‌های کشاورزی آبی شامل کشاورزی آبی و باغات، نقشه‌های GIS پوشش گیاهی و اطلاعات آب توسط سازمان جهاد کشاورزی استان آذربایجان شرقی تهیه شد.

مدل بارش-رواناب

پس از کوچک مقیاس‌سازی داده‌های اقلیمی منطقه‌ای، از مدل رواناب- آب باران IHACRES برای شبیه‌سازی رواناب استفاده گردید. مدلIHACRES برای مدل‌سازی بارش-رواناب در مقیاس حوضه آبریز استفاده می‌شود. IHACRES توسط موسسه هیدرولوژی و مرکز مطالعات منابع و محیط‌زیست در دانشگاه ملی استرالیا (Croke and Jakeman, 2008)توسعه داده شده است. مدل IHACRESبرای تخمین رواناب به‌اندازه حوضه، بارندگی و دمای هوا یا تبخیر نیاز دارد (Littlewood et al., 2007). جهت کالیبراسیون کردن مدل، سری‌های زمانی ماهانه بارندگی، رواناب و میانگین دما لحاظ می‌شوند. پس از کالیبراسیون مدل، جریان ورودی به مخزن حوضه آبریز با در نظر گرفتن اثرات تغییرات اقلیمی بر اساس بارندگی و دما شبیه‌سازی می‌شود. پس از کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل IHACRES، با استفاده از داده‌های اقلیمی تولیدشده، رواناب حوضه در طول سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ محاسبه می‌شود. برای ارزیابی دقت مدل IHACRES، از شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی DC استفاده شد.

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(l_o - l_p\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(l_o - \bar{l}_p\right)^2}, \quad RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{N}\frac{\left(l_o - l_p\right)^2}{ND}} \qquad (۱)$$

که در آن l_o مقادیر مشاهده‌شده l_p مقادیر شبیه‌سازی‌شده و n تعداد داده‌ها است.

شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی

مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی کشاورزی

برای محاسبه آب موردنیاز بخش کشاورزی، الگوی کشت موجود شبکه آبیاری سد زنوز در نظر گرفته شد. سطح زیر کشت برای بهبود عملکرد سد با استفاده از بهینه‌سازی خطی بهینه گردید. برای بهینه‌سازی الگوی کشت، تابع سود خالص اقتصادی به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد. همچنین، حداقل و حداکثر سطح زیر کشت، میزان آب اختصاص داده شده به بخش کشاورزی و کل سطح زیر کشت به‌عنوان محدودیت‌های تابع هدف تعریف شدند. توابع بهینه‌سازی الگوی کشت را به شرح زیر می‌توان ارائه کرد:

$$Max\,C(x) = Max\sum_{i=1}^{i=4}(Bi \times Ai) \qquad (۲)$$

$$AiMin \le Ai \le AiMax \qquad (۳)$$

$$\sum_{i=1}^{i=4} Ai \le ATotal \qquad (۴)$$

$$\sum_{i=1}^{i=4} Ai.wi \le wTotal \qquad (۵)$$

که در آن C(x) سود نهایی، Ai سطح زیر کشت (هکتار)، Bi سود خالص محصول به ازای هر (هکتار)، AiMin حداقل سطح زیر کشت (هکتار)، AiMax سطح زیر کشت حداکثر (هکتار)، ATotal کل سطح زیر کشت (هکتار)، wi حجم آب موردنیاز محصول (مترمکعب در هکتار) و WTotal حجم کل آب موجود (مترمکعب) است. تابع بهینه‌سازی الگوی کشت با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی و بهینه‌ساز LINGO انجام شد.

روش سیستم دینامیک

اساس روش شبیه‌سازی سیستم دینامیک بر پایه بازخورد و رویدادهای شیءگرا است. یکی از مفاهیم مهم در رویکرد سیستم دینامیک، قانون پیوستگی است که مفهوم اساسی مسیریابی در مخازن است. در این روش، از چهار ابزار ذخیره‌سازی، جریان، رابطها و مبدل‌ها برای مدل‌سازی استفاده می‌شود و ذهنیت متخصص بر نمودارهای علیت و احتمالی و درنهایت ذخیره‌سازی و جریان متمرکز است (Sterman, 2002). مدل‌های دینامیک سیستم امکان گنجاندن متغیرهای کمی و کیفی را به‌طور هم‌زمان در سیستم فراهم می‌کنند. در مدل‌های ریاضی، امکان ویرایش پارامترهای کیفی وجود ندارد. در مدل‌های دینامیک، با نوشتن معادلات غیردقیق برای متغیرهای کیفی و شبیه‌سازی عددی، تأثیر این متغیرها بر کل سیستم در نظر گرفته می‌شود. در نرم‌افزار ونسیم (Vensim)، روابط بین متغیرهای سیستم با اتصال کلمات توسط فلش توصیف و تعریف می‌شود (Sterman, 2002). پس از تعریف روابط فوق و ساخت مدل، می‌توان تمام جنبه‌های رفتار سیستم را شبیه‌سازی کرد. محیط نرم‌افزار Vensim کاربران را از مبانی ریاضی و همچنین جزئیات زبانی بی‌نیاز می‌کند.

این نرم‌افزار می‌تواند معادلات غیرخطی بین چندین متغیر را به‌طور هم‌زمان حل کند. در این نرم‌افزار، نمودارها با مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل مرتبه اول (اغلب غیرخطی) ساخته می‌شوند که با روش‌های اویلر یا رانگ–کوتا حل می‌شوند. روش مدل‌سازی در این نرم‌افزار، پیشرفت کلیات با جزئیات بیشتر است تا توابع و اجزای اتصال به‌تدریج افزایش یابند تا یک مدل کامل برای اجرا تهیه شود. مدل‌سازی در نرم‌افزار Vensim شامل این مراحل زیر است: جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات موردنیاز، پردازش و آماده‌سازی داده‌ها، تعیین و محاسبه میزان منابع آب، تعیین و محاسبه نیازهای آبی در بخش‌های مختلف مصرف، آماده‌سازی اطلاعات برای استفاده در مدل Vensim، ایجاد مدل در محیط نرم‌افزار و تجزیه‌وتحلیل نتایج مدل (Sterman, 2002).

هدف از ساخت هر سد، تأمین مجموعه‌ای از انواع تقاضا مانند نیازهای شرب، صنعت و کشاورزی است که برای حوضه هر سد محاسبه و به‌عنوان نیازهای برنامه‌ریزی آن سد در نظر گرفته می‌شود. همچنین، در طراحی هر سد، باید نیازهای زیست‌محیطی نیز در نظر گرفته شود. سد زنوز با هدف تأمین نیازهای کشاورزی و زیست‌محیطی طراحی و ساخته شده است. برای شبیه‌سازی با نرم‌افزار Vensim، ابتدا لازم است ساختار مدل (تعریف متغیرهای سیستم، ارتباطات و روابط بین متغیرها) طراحی شود و پس از وارد کردن داده‌های مربوطه در نرم‌افزار، پیاده‌سازی و شبیه‌سازی مدل انجام شود تا نتایج خروجی حاصل شود. لازم است قبل از اجرای مدل، زمان مدل تنظیم شود تا مدل معادل تعداد ماه‌های طول دوره آماری باشد. با مراجعه به فایل خروجی مدل شبیه‌سازی، می‌توان با مقایسه داده‌های ورودی تقاضاهای مختلف و اعداد خروجی عرضه مربوط به هر تقاضا، درصد حجمی و زمانی عرضه را محاسبه کرد. لازم به ذکر است که تعیین میزان آب تخصیص‌یافته از منابع آب به هر تقاضا و مصارف آب در حوزه آبخیز بر اساس اولویت و با توجه به محدودیت‌های کیفی و امکان انتقال تخصیص از یک مصرف به مصارف دیگر انجام می‌شود.

در این مطالعه، پس از جمع‌آوری اطلاعات هیدرولوژیکی و هواشناسی منطقه، مدل مفهومی سد زنوز و حوضه آبریز شناسایی و نمودارهای حلقه‌های علی حوضه در محیط نرم‌افزار Vensim ترسیم شد. نمودار علت و معلولی سد زنوز در حالت کلی (بدون در نظر گرفتن جزئیات) در شکل ۲ به‌صورت حلقه‌های بازخورد نشان داده شده است. در این شکل، میزان ذخیره در سد با متغیرهای ورودی تبخیر، نشت از دیواره و سد، رهاسازی و سرریز نشان داده شده است. در این مدل، حجم مخزن با متغیر ذخیره (متغیر حالت) نشان داده شده است و دبی ورودی، مقادیر تبخیر، دبی خروجی و مقادیر سرریز به‌صورت متغیر دبی (نرخ) نشان داده شده‌اند. میزان سرریز از مخزن سد با توجه به مقادیر ورودی، خروجی و ارتفاع برابر با حداکثر حجم مخزن محاسبه می‌شود. دبی‌های خروجی بر اساس سیاست‌های بهره‌برداری و الزامات پایین‌دست تعیین می‌شوند. این مقدار از مجموع دبی ورودی و حجم ذخیره مخزن به همراه تلفات مخزن و میزان نشت کسر می‌شود. حجم باقیمانده با حجم معادل حداکثر ارتفاع آب در مخزن سد مقایسه شده و مازاد آن به‌عنوان سرریز از مخزن سد استخراج می‌شود. برای تلفات، میزان نشت آب از دیواره‌ها و پی سد و تبخیر از سطح مخزن سد در نظر گرفته شده است. در مرحله بعد، داده‌های موردنیاز وارد مدل شدند. این داده‌ها شامل سری زمانی بلندمدت تخلیه ماهانه به مخزن سد، تبخیر ماهانه از مخزن، حجم–سطح–ارتفاع مخزن، حداکثر حجم مخزن و حجم مرده مخزن، توزیع ماهانه نیازهای کشاورزی و نیازهای زیست‌محیطی است.

حجم مخزن در هر زمان را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$Reservoir\ volume\ (t) = \int_{t_0}^{t} \left[Inflow(t) - Evaporation(t) - Spill(t) - Release(t) \right] + V(t_0) \quad (۶)$$

که در آن Inflow (t) جریان ورودی به مخزن، Evaporation (t) نشان‌دهنده تبخیر از مخزن، Spill (t) آب ریخته شده از مخزن، Release (t) میزان آب آزادشده برای تأمین تقاضاها و $V(t_0)$ حجم اولیه مخزن است. در مدل SD ایجاد شده، از سیاست بهره‌برداری استاندارد برای تصمیم‌گیری در مورد میزان تخصیص آب استفاده می‌شود. در این روش، آب آزاد شده برابر با تقاضاها در نظر گرفته می‌شود اگر:

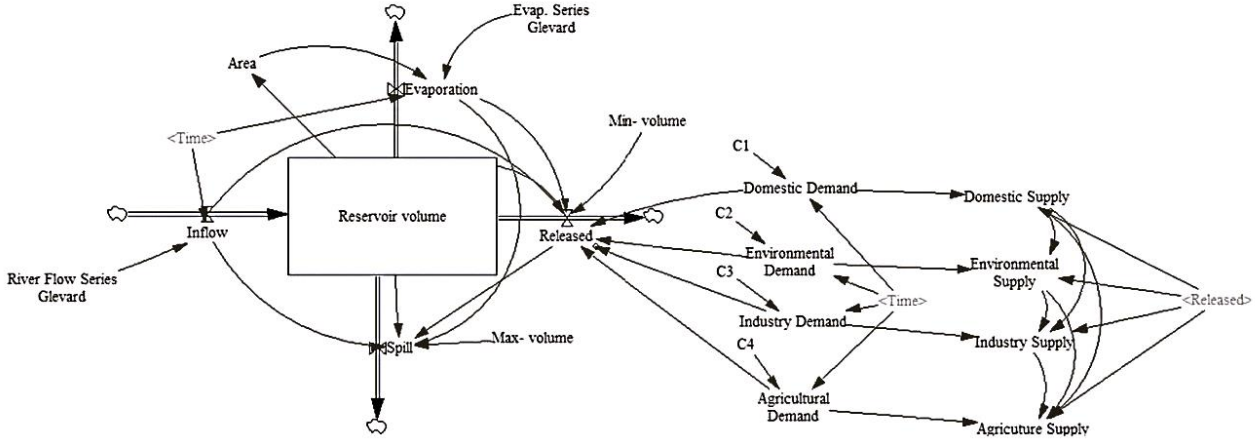
$$Reservoir\ volume\ (t) + Inflow(t) - Evaporation(t) - Demand(t) > V_{\min} \quad (۷)$$

Demand (t) مجموع تقاضای خانگی، تقاضای صنعتی، تقاضای کشاورزی، تقاضای زیست‌محیطی و V_{min} حداقل حجم مخزن است. اگر شرط بالا برقرار نباشد، جریان آزاد شده برابر خواهد بود با:

$$Reservoir\ volume\ (t) + Inflow(t) - Evaporation(t) - V_{\min} \quad (۹)$$

با استفاده از معادلات (۶) تا (۸) و جریان ورودی رودخانه، تبخیر از سطح مخزن سد و سرریز و حجم مخزن در سد، میزان تخصیص آب ماهانه به بخش‌های مختلف شبیه‌سازی شد. اولویت‌های تقاضای آب در هر ماه به این ترتیب تعیین می‌شود: بخش‌های خانگی، محیط‌زیست، صنعت و کشاورزی. تأمین آب موردنیاز بخش کشاورزی آخرین اولویت است. بنابراین، اگر آب کافی در مخزن سد وجود نداشته باشد، مدل کمبود را به بخش کشاورزی منتقل می‌کند. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، ابتدا میزان آب رها شده از سد با میزان آب موردنیاز برای مصارف خانگی (C1) مقایسه شده و ۱۰۰٪ نیازهای آشامیدنی تأمین می‌شود و مابقی برای نیازهای زیست‌محیطی (C2)، نیازهای صنعتی (C3) و درنهایت برای نیازهای بخش کشاورزی (C4) در نظر گرفته می‌شود. به‌عنوان مثال، اگر میزان آب رها شده کمتر از نیاز آب خانگی (C1) باشد، درصد تأمین

این بخش کمتر از ۱۰۰٪ خواهد بود و به دلیل کم بودن میزان آب رها شده، درصد تأمین آب برای سایر بخش‌ها صفر خواهد بود. بر این اساس، مقادیر پنج شاخص برای هر ماه محاسبه شد. این فرآیند برای دوره آینده اعمال می‌شود و با توجه به محاسبه پارامترهای موردنیاز مدل در مراحل قبلی، عملکرد سد با اعمال الگوهای کشت موجود و بهینه ارزیابی می‌شود. ازاین‌رو، داده‌های سری زمانی تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 ورودی مدل Vensim هستند. در شکل ۳ مراحل مدل‌سازی در نظر گرفته‌شده نشان داده شده است.



شکل ۲- نمودار دینامیکی جریان و ذخیره سد زنوز در نرم‌افزار ونسیم

لازم به ذکر است که توسعه برداشت از منابع آب طی سال‌های مختلف در حوضه، تأثیر خود را بر میزان برداشت ثبت‌شده در ایستگاه می‌گذارد. در شبیه‌سازی طرح‌های توسعه منابع آب، فرض بر این است که رژیم دبی رودخانه در موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری در سال‌های آینده مشابه سال‌های گذشته خواهد بود. بنابراین، ابتدا لازم است تأثیر حوضه‌های آبریز بالادست بر منابع آب ثبت‌شده در ایستگاه‌های هیدرومتری که باعث کاهش دبی رودخانه در موقعیت ایستگاه هیدرومتری در سال‌های آینده می‌شود، حذف شود و سپس از آن برای شبیه‌سازی طرح‌های توسعه آب استفاده شود. برای این منظور، از روش حذف روند استفاده شد. در مرحله طراحی مدل مخزن سد، تمام پارامترهای ورودی و خروجی با توجه به ارتباط آن‌ها با یکدیگر در محیط نرم‌افزار Vensim به مخزن سد زنوز کدگذاری شدند. سپس برای هر یک از پارامترها، طبق استاندارد برنامه، خاصیت جریان یا ذخیره داده شد و شکل متغیر یا ثابت داده شد و برای پارامترهایی که به‌صورت سری هستند (مانند جریان ورودی)، داده‌های موردنیاز وارد شدند. برای بقیه پارامترها، فرمول شرطی «اگر-آنگاه» نوشته شد تا مدل با استفاده از رابطه‌ای که با هم دارند، اجرا شود. در مرحله کالیبراسیون، حجم مخزن از نظر تعادل بررسی شد.

الگوریتم کرم شب‌تاب

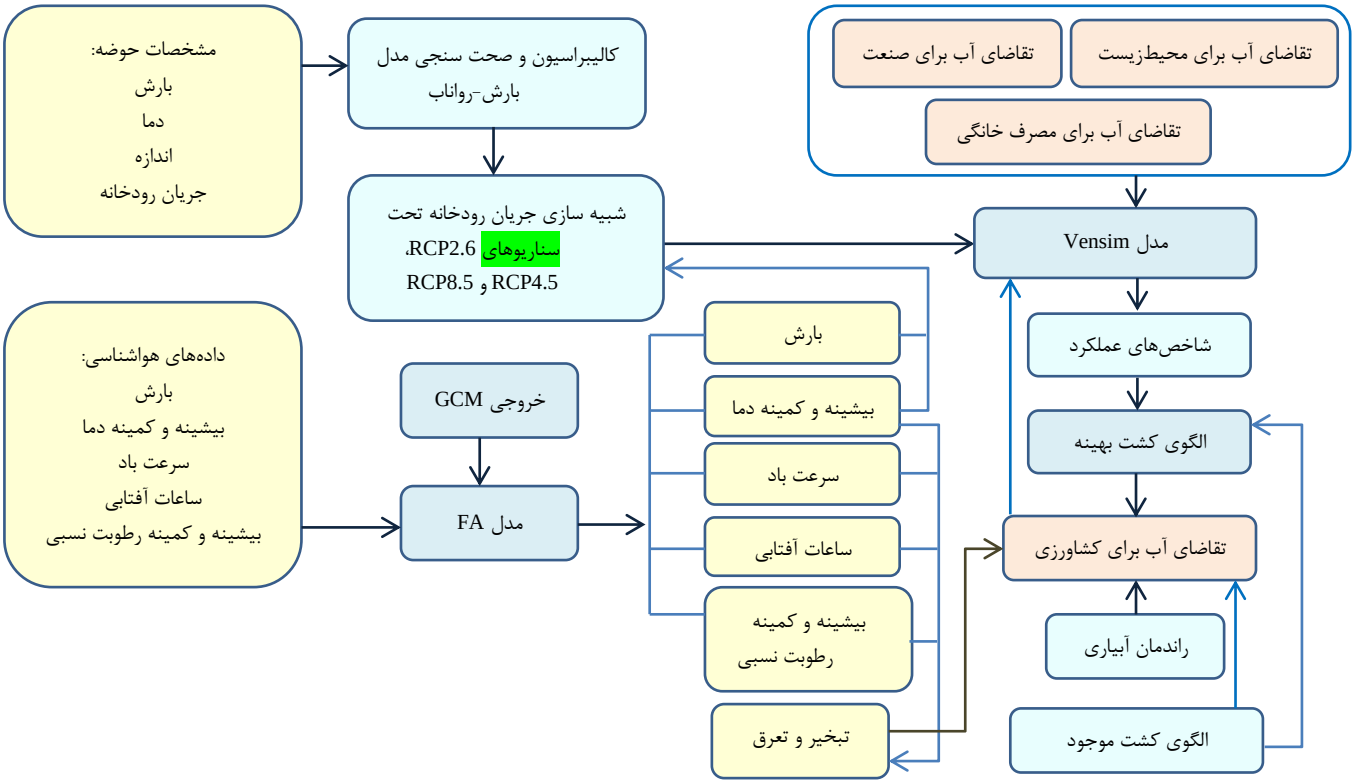
الگوریتم کرم شب‌تاب (Firefly Algorithm) به اختصار FA در اواخر سال ۲۰۰۷ و توسط Yang معرفی شده است که ایده اصلی آن، از ارتباط نوری میان کرم‌های شب‌تاب الهام گرفته شده است (Yang and He, 2013). این الگوریتم را می‌توان از مظاهر هوش ازدحامی (Swarm Intelligence) دانست که در آن از همکاری (و احتمالاً رقابت) اعضای ساده و کم‌هوش، مرتبه بالاتری از هوشمندی ایجاد می‌شود که قطعاً توسط هیچ‌یک از اجزا قابل حصول نیست. این الگوریتم برای حل و بررسی محدوده وسیعی از مسائل بهینه‌سازی به‌کار برده شده است. از این میان می‌توان به حل مسئله کلاسیک فروشنده دوره‌گرد و همچنین مسئله راه‌یابی در شبکه‌های مخابرات راه دور اشاره نمود. مساله فروشنده دوره گرد (Traveling Salesman Problem) و یا به اختصار TSP، یکی از مسائل مشهور بهینه‌سازی ترکیبی است. در این مسئله، یک فروشنده دوره‌گرد می‌خواهد به چند شهر سفر کند و کالای خود را به فروش برساند. اما می‌بایست از تمام شهرها عبور کند، از هر شهر فقط یک‌بار عبور کند و با طی کوتاه‌ترین مسیر، سفر خود را به پایان برساند (Yang and He, 2013).

حل این مسئله کاربردهای وسیعی در حوزه‌های مختلف مهندسی دارد. ازجمله مسائلی که ازنظر ریاضی با مسئله TSP معادل هستند، می‌توان به حل انواع مسائل زمان‌بندی، مسیریابی، جایابی کالا در انبار، جایابی ماشین‌ها در کارگاه‌ها، و طراحی مدارات چاپی اشاره نمود. الگوریتم FA یک الگوریتم فراکتشافی، با الهام از رفتارهای کرم شب‌تاب مصنوعی است. این الگوریتم با فرضیه زیر فرمول‌بندی شده است:

– یک کرم شب‌تاب تمام کرم شب‌تاب‌های دیگر را جذب می‌کند.

– جذابیت متناسب است به روشنایی خود، و برای هر دو کرم شب‌تاب یکی کمتر روشن خواهد شد، بااین‌حال، روشنایی می‌تواند به‌عنوان فاصله آن‌ها افزایش و یا کاهش یابد.

– اگر کرم شب‌تابی روشن‌تر از کرم شب‌تاب داده‌شده وجود داشته باشد آن را به‌طور تصادفی حرکت خواهد داد (Yang and He, 2013).



شکل ۳- مدل‌سازی در نظر گرفته‌شده در تحقیق

الگوریتم FA با مدل‌سازی رفتار مجموعه‌ای از کرم‌های شب‌تاب و تخصیص مقداری مرتبط با برازندگی مکان هر کرم شب‌تاب به‌عنوان مدلی برای میزان رنگ‌دانه‌های شب‌تاب و به‌روز کردن مکان کرم‌ها در تکرارهای متوالی الگوریتم به جستجوی جواب بهینه مسئله می‌پردازد. درواقع دو مرحله اصلی الگوریتم در هر تکرار فاز به‌روز کردن رنگ‌دانه و فاز حرکت هستند (Yang and He, 2013). کرم‌های شب‌تاب به سمت کرم‌های شب‌تاب دیگر با رنگ‌دانه بیشتر که در همسایگی آن‌ها باشند حرکت می‌کنند. به‌این‌ترتیب طی تکرارهای متوالی مجموعه به سمت جواب بهتر متمایل می‌گردد.

تعریف شاخص‌های عملکرد

جهت ارزیابی عملکرد مخزن، از چهار شاخص شامل شاخص قابلیت اطمینان مبتنی بر زمان، شاخص آسیب‌پذیری، شاخص تاب‌آوری و شاخص پایداری منابع آب استفاده شد. شاخص قابلیت اطمینان، احتمال تأمین میزان تقاضای آب در دوره زمانی شبیه‌سازی‌شده را نشان می‌دهد. شاخص آسیب‌پذیری، احتمال عدم توانایی منابع آب (سد) در پاسخگویی به تقاضا را بیان می‌کند. شاخص تاب‌آوری، توانایی سیستم را در سازگاری با شرایط مختلف نشان می‌دهد. شاخص پایداری منابع آب تابعی از شاخص‌های مذکور است.

روابط این شاخص‌ها در فرمول‌های (۹) تا (۱۲) آورده شده است. در این روابط، i و t به ترتیب نشان‌دهنده سال و ماه هستند، Rel^i قابلیت اطمینان مبتنی بر زمان (McMahon et al., 2006)، D^i_t کمبود آب، m تعداد کل سری‌های زمانی (ماه) که دوره تحلیل موجود (تاریخی) یا شبیه‌سازی را پوشش می‌دهند، و Vul^i مقدار احتمالی کمبودها (Loucks and van Beek, 2005)، در صورت وقوع، است. Res^i احتمال بازیابی یک سیستم از یک دوره خرابی است و SI^i یک شاخص خلاصه است که پایداری سیستم‌های منابع آب را اندازه‌گیری می‌کند. کمبود آب در تأمین تقاضاها به‌صورت معادله (۱۳) بیان می‌شود (Loucks and van Beek, 2005).

$$Rel^i = \frac{No.of\ times\ D^i_t = 0}{m} \quad (۹)$$

$$Vul^i = \frac{\sum_{t=0}^{t=m} D^i_t \,/\, No.of\ times\ D^i_t > 0\ occurred}{Water\ demand^i} \quad (۱۰)$$

$$Res^i = \frac{No.of\ times\ D^i_t = 0\ \ follows\ D^i_t > 0}{No.of\ times\ D^i_t > 0\ occurred} \quad (۱۱)$$

نتایج و بحث

مدل‌سازی تغییرات اقلیمی

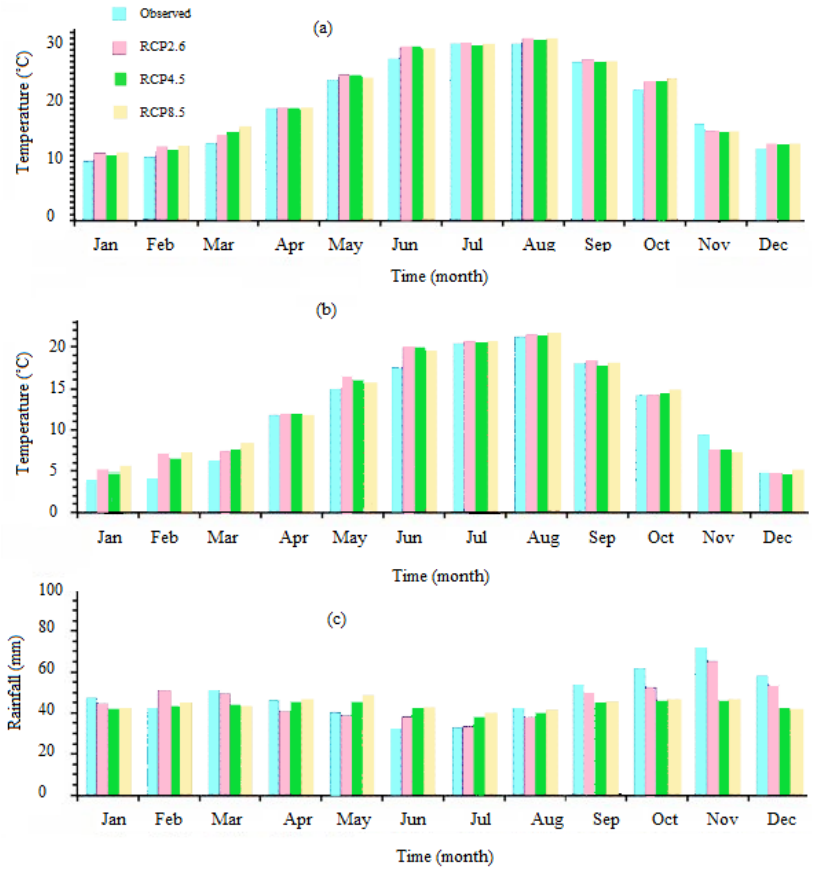
در این مطالعه، داده‌های آب و هوایی مشاهده‌شده (یعنی بارندگی ماهانه، حداکثر و حداقل دمای هوا، حداکثر و حداقل رطوبت نسبی، سرعت باد ماهانه و ساعات آفتابی ماهانه) برای دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۰ برای کالیبراسیون استفاده شده و دوره ۲۰۱۱-۲۰۲۰ برای اعتبارسنجی مدل FA در نظر گرفته شده است. نتایج ارزیابی عملکرد نشان داد که عملکرد ریزمقیاس‌نمایی پارامترهای اقلیمی توسط مدل FAبا پارامترهای اقلیمی مشاهده‌شده قبلی مطابقت خوبی دارد (جدول ۱). حداکثر دمای هوا، حداقل دمای هوا و بارندگی ریزمقیاس‌شده برای حوضه در تمام افق‌های زمانی آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) و تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 توسط مدل FA در شکل ۴ نشان داده شده است. پیش‌بینی‌ها روند افزایشی در دمای هوا را نشان می‌دهد. در دوره آتی، میانگین حداکثر دمای سالانه بر اساس سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۰/۷۸، ۰/۷۰ و ۰/۸۳ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. میانگین حداقل دمای سالانه بر اساس سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۰/۶۲، ۰/۵۷ و ۰/۶۶ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. در دوره آتی، میانگین بارندگی سالانه بر اساس سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۸، ۱۲ و ۱۰ درصد کاهش خواهد یافت. بیشترین افزایش بارندگی در طول سناریوی RCP2.6 به میزان ۱۰ میلی‌متر در ماه فوریه و بیشترین افزایش بارندگی در طول سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به میزان ۱۲ و ۱۳ میلی‌متر به ترتیب در ماه ژوئن رخ خواهد داد. همچنین، بیشترین کاهش بارندگی تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب به میزان ۱۵، ۳۲ و ۳۰ میلی‌متر در ماه نوامبر رخ خواهد داد.

رواناب

داده‌های تاریخی بارش، دمای هوا و رواناب در طول سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۰ برای کالیبراسیون مدل IHACRES استفاده شده و دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. برای ارزیابی تفاوت بین مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده، RMSE و DC برای هر دو دوره کالیبراسیون و اعتبارسنجی محاسبه شدند. نتایج ارزیابی مدل IHACRES در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد که مدل IHACRES توانایی قابل قبولی در شبیه‌سازی جریان حوضه مطالعاتی دارد. میانگین رواناب ماهانه شبیه‌سازی‌شده در طول دوره تغییر اقلیم (دوره آینده) و دوره پایه (دوره تاریخی) در شکل ۵ نشان داده شده است. بر اساس این شکل، رواناب احتمالاً در دوره آینده ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ در مقایسه با دوره پایه کاهش خواهد یافت. رواناب حوضه در دوره آینده در مقایسه با دوره پایه در اکثر ماه‌ها کاهش خواهد یافت. حداکثر کاهش رواناب در ماه جولای رخ خواهد داد. رواناب حوضه در ماه مارس تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۵۰، ۵۵ و ۵۲ درصد کاهش خواهد یافت. میانگین رواناب سالانه در دوره پایه ۳ مترمکعب بر ثانیه بود، اما در دوره آینده، میانگین جریان سالانه حوضه تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۲/۶۵، ۱/۹۴ و ۱/۹۰ مترمکعب بر ثانیه خواهد بود. بنابراین، میانگین جریان سالانه بر اساس سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۱۲، ۳۰ و ۳۲ درصد کاهش می‌یابد.

جدول ۱- عملکرد آماره‌های مدل FA

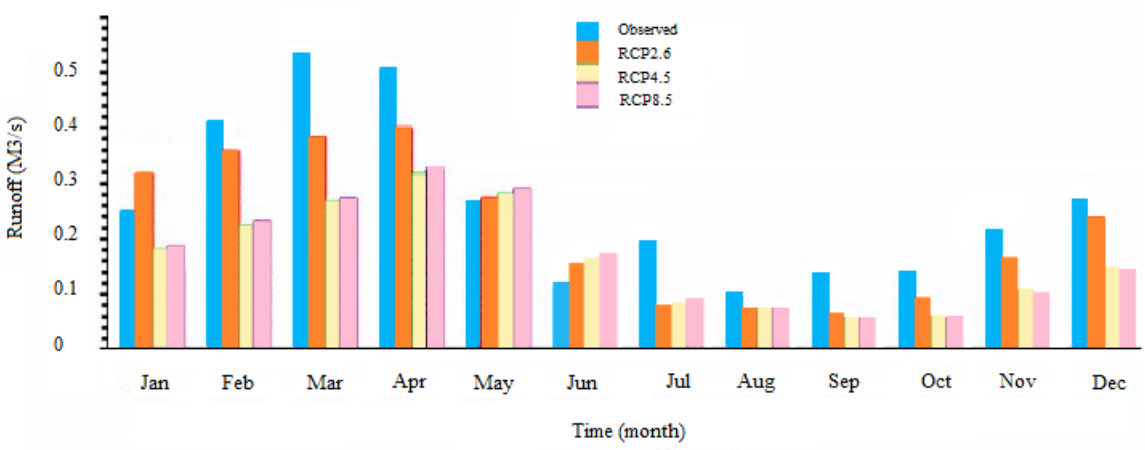
پارامتر	معیارهای ارزیابی			
	کالیبراسیون		اعتبارسنجی	
	DC	RMSE	DC	RMSE
حداکثر دمای هوا (°C)	۰/۹۸	۰/۸۰	۰/۹۷	۰/۹۳
حداقل دمای هوا (°C)	۰/۹۹	۰/۶۳	۰/۹۹	۰/۶۹
رطوبت نسبی (٪)	۰/۷۷	۱/۷۱	۰/۷۲	۱/۷۷
سرعت باد(m/s)	۰/۸۳	۰/۱۴	۰/۷۹	۰/۱۸
ساعات آفتابی (hr)	۰/۷۹	۰/۶۹	۰/۷۷	۰/۷۵
بارش (mm)	۰/۸۰	۱/۶۶	۰/۷۲	۱/۸۹



شکل ٤- میانگین ماهانه مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده در دوره ۲۰۲۱-۲۰٤۰ توسط مدل FA: (الف) حداکثر دمای هوا، (ب) حداقل دمای هوا، و (ج) بارندگی بر اساس سناریوهای تغییر اقلیم

جدول ۲- مقادیر معیارهای ارزیابی برای دوره‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی

دوره	معیارهای ارزیابی	
	DC	RMSE
کالیبراسیون	۰/۹۵	۱/۲۳
اعتبارسنجی	۰/۹۴	۱/۸۷



شکل ٥- میانگین رواناب ماهانه شبیه‌سازی‌شده در طول دوره تغییر اقلیم (۲۰۲۱-۲۰٤۰) تحت سناریوهای تغییر اقلیم و در طول دوره پایه

الگوی کشت

الگوی کشت شامل محصولات مرکبات، گندم، جو و پنبه است. شبیه‌سازی عملکرد مخزن نشان می‌دهد که سد قادر به تأمین آب موردنیاز الگوی کشت موجود نخواهد بود. همچنین، در دوره بعدی، مخزن قادر به تأمین آب موردنیاز بخش‌های شرب، محیط‌زیست، صنعت و کشاورزی نخواهد بود. بنابراین، برای بهبود عملکرد مخزن سد و کاهش میزان و شدت کمبود آب در بخش‌های مختلف، الگوی کشت بهینه شده است. OCP با استفاده از LINGO برای سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، با توجه به حجم آب موجود، عملکرد محصولات کشت‌شده و کل سطح زیر کشت تعیین می‌شود. جدول ۳ به‌عنوان نمونه OCP را برای RCP8.5 نشان می‌دهد. به‌طورکلی، نتایج نشان می‌دهد که با تغییر الگوی کشت، سطح زیر کشت محصولات آبی کاهش و سطح زیر کشت محصولات دیم افزایش می‌یابد. طبق جدول ۳، سطح زیر کشت مرکبات ۱۰۰ درصد افزایش خواهد یافت. همچنین سطح زیر کشت محصول گندم دیم تا ۲۰۰ درصد رشد نشان می‌دهد. در مقابل، سطح زیر کشت جو کاهش و سطح زیر کشت پنبه آبی بدون تغییر باقی خواهد ماند.

جدول ۳- الگوی کشت موجود و بهینه شبکه آبیاری سد مطالعاتی تحت سناریوی RCP8.5

محصول	سطح کشت موجود (ha)	سطح کشت بهینه (ha)
گندم	۱۰۰۰	۳۰۰۰
جو	۷۰۰	۵۰۰
کتان	۲۰۰	۲۰۰
مرکبات	۱۰۰۰	۲۰۰۰

مدل‌سازی سد در نرم‌افزار Vensim

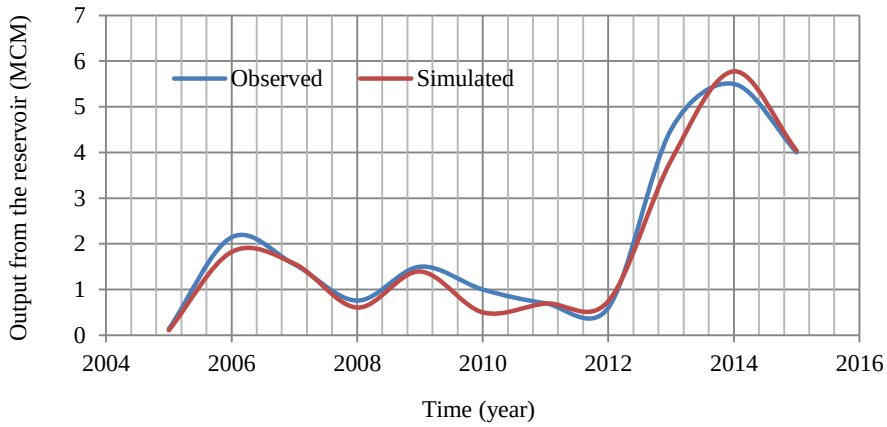
مدل‌سازی به‌گونه‌ای انجام شد که تفاوت آماری معنی‌داری بین واقعیت و مدل وجود نداشته باشد. بر این اساس، از چندین آزمون برای مقایسه مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده استفاده شد. ابتدا داده‌های پیش‌بینی پارامترهای هواشناسی توسط مدل FA کالیبره و تأیید شدند (جدول ۱). همچنین، پیش‌بینی مقادیر رواناب توسط مدل IHACRES کالیبره و اعتبارسنجی شد (جدول ۲). برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های مدل Vensim، از آزمون‌های تکرار رفتار، سازگاری واحد و ارزیابی ساختار استفاده شد. در آزمون تکرار رفتار، خروجی مدل برای دوره تاریخی شبیه‌سازی‌شده و با داده‌های اندازه‌گیری مقایسه شد. شکل ۶ نمودار جریان خروجی از سد را برای دوره ۲۰۰۵-۲۰۱۵ نشان می دهد. نتایج آزمون تکرار نشان می‌دهد که مدل توانسته است مقدار خروجی را با RMSE =۰/۶۸ و DC =۰/۸۹ پیش‌بینی کند. در آزمون سازگاری واحد، واحدهای اندازه‌گیری برای هر متغیر در مدل بررسی شدند. آزمون ارزیابی ساختار، صحت مدل را ازنظر سازگاری آن با نمودار دینامیکی ذخیره و جریان (شکل ۲) بررسی می‌کند. عملکرد سد در شرایط تغییر اقلیم و الگوی کشت موجود توسط شبیه‌سازی شد. اولویت‌های تقاضای آب به ترتیب زیر تعیین شدند: بخش‌های خانگی، محیط‌زیست، صنعت و کشاورزی. نتایج نشان داد که در صورت ادامه الگوی کشت فعلی، کمبود آب در دوره آینده در همه بخش‌ها رخ خواهد داد. بنابراین، برای کاهش تنش آبی و بهبود عملکرد سد از مدل کشت بهینه استفاده شد. نتایج نشان داد که با ادامه روند فعلی الگوی کشت، در خوش‌بینانه‌ترین شرایط (RCP2.6)آب برای مصارف خانگی، محیط‌زیست، صنعت و کشاورزی به مدت ۶ سال بدون کمبود تأمین خواهد شد و در بدبینانه‌ترین شرایط (RCP8.5) در مورد تقاضای آب همه بخش‌ها، تأمین آب فقط در سال ۲۰۲۲ کافی خواهد بود و در سال‌های دیگر، کمبود آب در همه بخش‌ها وجود خواهد داشت. در صورت اعمال مدل الگوی کشت بهینه، در شرایط خوش‌بینانه، تقاضای همه بخش‌ها تا سال ۲۰۳۰ بدون هیچ کمبودی و در شرایط بدبینانه، تقاضا به مدت ۴ سال (۲۰۲۱-۲۰۲۴) تأمین و آب موردنیاز همه بخش‌ها به‌طور کامل تأمین خواهد شد. نتایج مدل Vensim در مورد عملکرد مخزن سد در تأمین آب موردنیاز بخش‌های مختلف نشان داد که درصورت ادامه الگوی کشت موجود، برای سناریوهای مختلف اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب در ۶ (۲۰۲۱-۲۰۲۶)، ۲ (۲۰۲۱-۲۰۲۲) و ۲ (۲۰۲۱-۲۰۲۲) سال آینده، مشکلی در تأمین وجود نخواهد داشت و بلافاصله بحران کمبود آب در منطقه ایجاد خواهد شد. در صورت اعمال OCP، بر اساس سناریوهای مختلف اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5، تأمین آب منطقه به ترتیب در ۱۰ (۲۰۲۱-۲۰۳۰)، ۴ (۲۰۲۱-۲۰۲۴) و ۴ (۲۰۲۱-۲۰۲۴) سال آینده دشوار نخواهد بود و پس از آن، کمبود آب به‌تدریج رخ خواهد داد. بنابراین، استفاده از OCP شدت کمبود آب را کاهش می‌دهد.

جدول ۴ مقادیر شاخص‌های ارزیابی تأمین آب به بخش‌های مختلف و کل تقاضای آب را در شرایط ادامه الگوی کشت موجود و اعمال OCP در سناریوهای اقلیمی نشان می‌دهد. این شاخص‌ها بر اساس معادلات (۹) تا (۱۳) محاسبه شده‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهد که

در صورت اعمال مدل بهینه، پنج شاخص قابلیت اطمینان، آسیب‌پذیری، تاب‌آوری، پایداری و کمبود در تمام بخش‌های مصرف آب به‌طور نسبی بهبود خواهند یافت.

جدول ٤- مقادیر شاخص‌های ارزیابی تأمین آب به بخش‌های مختلف و کل تقاضای آب در شرایط ادامه الگوی کشت موجود و بهینه تحت سناریوهای اقلیمی

الگوی کشت	سناریو اقلیمی	قابلیت اطمینان	آسیب‌پذیری	تاب‌آوری	پایداری	کمبود (%)
بخش خانگی						
موجود	RCP2.6	۰/۷۶۰	۰/۲۷۶	۰/۰۳۸	۰/۲۰۹	۸
	RCP4.5	۰/۶۷۵	۰/۲۴۷	۰/۰۲۹	۰/۱۷۱	۱۰
	RCP8.5	۰/۶۸۴	۰/۲۵۷	۰/۰۲۹	۰/۱۸۱	۱۰
بهینه	RCP2.6	۰/۸۲۷	۰/۲۹۵	۰/۰۳۸	۰/۲۴۷	۵
	RCP4.5	۰/۷۶۰	۰/۲۹۵	۰/۰۳۸	۰/۲۲۸	۸
	RCP8.5	۰/۷۶۰	۰/۲۸۵	۰/۰۳۸	۰/۲۱۹	۹
بخش محیط‌زیست						
موجود	RCP2.6	۰/۷۳	۰/۲۰	۰/۱۱	۰/۱۳	۳۳
	RCP4.5	۰/۶۴	۰/۲۱	۰/۱۲	۰/۱۲	۴۸
	RCP8.5	۰/۶۲	۰/۲۰	۰/۱۲	۰/۱۱	۵۰
بهینه	RCP2.6	۰/۸۱	۰/۲۰	۰/۱۰	۰/۱۵	۲۰
	RCP4.5	۰/۷۳	۰/۲۴	۰/۱۱	۰/۱۶	۳۱
	RCP8.5	۰/۷۰	۰/۲۳	۰/۰۹	۰/۱۵	۳۰
بخش صنعت						
موجود	RCP2.6	۰/۶۷۵	۰/۱۸۱	۰/۰۸۶	۰/۱۲۴	۲۸
	RCP4.5	۰/۵۶۱	۰/۱۶۲	۰/۰۷۶	۰/۰۸۶	۳۸
	RCP8.5	۰/۵۴۲	۰/۱۶۲	۰/۰۷۶	۰/۰۸۶	۴۰
بهینه	RCP2.6	۰/۷۵۱	۰/۱۹۰	۰/۰۸۶	۰/۱۳۳	۲۱
	RCP4.5	۰/۶۲۷	۰/۱۷۱	۰/۰۷۶	۰/۱۰۵	۳۱
	RCP8.5	۰/۶۲۷	۰/۱۸۱	۰/۰۷۶	۰/۱۰۵	۳۱
بخش کشاورزی						
موجود	RCP2.6	۰/۷۷۰	۰/۲۸۵	۰/۱۶۲	۰/۱۹۰	۳۶
	RCP4.5	۰/۷۰۳	۰/۲۷۶	۰/۱۷۱	۰/۱۷۱	۴۸
	RCP8.5	۰/۷۱۳	۰/۲۸۵	۰/۱۶۲	۰/۱۸۱	۵۳
بهینه	RCP2.6	۰/۸۵۵	۰/۳۹۰	۰/۱۸۱	۰/۲۸۵	۲۲
	RCP4.5	۰/۸۰۸	۰/۳۸۰	۰/۲۰۰	۰/۲۵۷	۳۳
	RCP8.5	۰/۷۹۸	۰/۳۸۰	۰/۱۸۱	۰/۲۵۷	۳۶
کل تقاضا						
موجود	RCP2.6	۰/۶۳۷	۰/۱۵۲	۰/۰۶۷	۰/۱۰	۲۵
	RCP4.5	۰/۵۰۴	۰/۱۴۳	۰/۰۵۷	۰/۰۶	۳۱
	RCP8.5	۰/۴۹۴	۰/۱۴۳	۰/۰۵۷	۰/۰۶	۳۵
بهینه	RCP2.6	۰/۷۴۱	۰/۱۷۱	۰/۰۵۷	۰/۱۲	۱۳
	RCP4.5	۰/۶۰۸	۰/۱۶۲	۰/۰۵۷	۰/۰۹	۱۹
	RCP8.5	۰/۵۸۹	۰/۱۶۲	۰/۰۴۸	۰/۰۹	۲۲



شکل ٦- نمودار جریان خروجی شبیه‌سازی‌شده و پیش‌بینی‌شده در دوره ۲۰۰۵-۲۰۱۵

در صورت ادامه الگوی کشت موجود، شاخص قابلیت اطمینان تأمین آب از مخزن تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۰/۶۳۷، ۰/۵۰۴ و ۰/۴۹۴ خواهد بود که با اعمال الگوی کشت بهینه به ترتیب ۱۲، ۱۲ و ۱۰ درصد بهبود خواهد یافت. شاخص آسیب‌پذیری تأمین آب موردنیاز از مخزن در صورت اعمال الگوی کشت موجود بر اساس سناریوهای اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۰/۱۵۲، ۰/۱۴۳ و ۰/۱۴۳ خواهد بود که با اعمال OCP احتمالاً با افزایش ۲/۵ درصدی در همه سناریوهای اقلیمی بهبود خواهد یافت. شاخص تاب‌آوری تقاضای آب از مخزن به ترتیب ۰/۰۶۷، ۰/۰۵۷ و ۰/۰۵۷ خواهد بود. با ادامه الگوی کشت موجود بر اساس سناریوهای اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 که با اعمال OCP بهبود خواهد یافت، به ترتیب به ۰/۰۵۷، ۰/۰۵۷ و ۰/۰۴۸ خواهد رسید. شاخص‌های پایداری سیستم مخزن سد در تأمین آب بخش‌های مختلف بر اساس سناریوهای اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۱۰، ۶ و ۶ درصد است که با اعمال OCP احتمالاً ۱۲، ۹ و ۹ درصد افزایش خواهد یافت. نتایج نشان می‌دهد که در صورت ادامه الگوی کشت فعلی در آینده، میانگین درصد تأمین آب موردنیاز توسط مخزن سد تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۷۲، ۶۵ و ۶۳ درصد خواهد بود. با اعمال OCP، این شاخص به ترتیب ۱۰، ۱۳ و ۱۲ درصد افزایش خواهد یافت. ستاری و همکاران (۲۰۲۰) نیز از رویکرد پویایی سیستم در محیط نرم‌افزار Vensim برای تخصیص آب مخزن سد زنوز برای مصارف آبیاری در شمال-غرب ایران استفاده کردند. آن‌ها منابع آب سطحی موجود در حوضه و میزان تقاضای آب کشاورزی و آب زیست‌محیطی را تعیین و یک برنامه تخصیص آب تدوین کردند. نتایج اجرای مدل آن‌ها نشان داد که درصد نیازهای کشاورزی در سد زنوز برابر با ۹۱/۲۴٪ و درصد نیازهای زیست‌محیطی برابر با ۹۹/۶٪ است. دو سناریوی مختلف شامل کاهش حجم آب ورودی به مخزن سد و تغییر در میزان نیاز برنامه‌ریزی سد برای ۱۰ سال آینده، برای مدل تعیین و نتایج آن بررسی شد. نتایج سناریوی اول روی مدل نشان داد که با کاهش میزان آب ورودی به مخزن سد در ۱۰ سال آینده، حجم آب پشت مخزن سد به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، در حالی که حجم تأمین نیازهای مختلف توسط مخزن سد کاهش می‌یابد. نتایج سناریوی دوم نشان داد که اگر میزان آب مورد نیاز سد، که شامل نیازهای کشاورزی است، در طول ۱۰ سال آینده به دلیل تغییرات اقلیمی یا افزایش زمین‌های کشاورزی ۲۰٪ افزایش یابد، حجم آب ذخیره شده در مخزن در تمام ماه‌های سال کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، مدل شبیه‌سازی سد زنوز با رویکرد پویایی سیستم در نرم‌افزار Vensim توسعه داده شد و اثرات سناریوهای تغییر اقلیم با در نظر گرفتن شاخص‌های متفاوت بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دمای هوا و کاهش بارندگی، جریان ورودی به مخزن سد احتمالاً کاهش خواهد یافت، به‌طوری‌که در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰، جریان ورودی به مخزن سد تحت سناریوهای اقلیمی به‌طور متوسط ۲۶ درصد کاهش خواهد یافت. کاهش جریان ورودی به مخزن این سد، قابلیت اطمینان مخزن در تأمین آب را کاهش می‌دهد، درحالی‌که آسیب‌پذیری ناشی از عدم تأمین نیازهای آبی را افزایش می‌دهد. اعمال مدل کشت بهینه تا حدودی شاخص‌های عملکرد مخزن سد را در تأمین نیازهای آبی بخش‌های مختلف بهبود می‌بخشد، اما نمی‌تواند عملکرد سیستم مخزن سد را تثبیت کند. با ادامه روند فعلی الگوی کشت، در خوش‌بینانه‌ترین شرایط تأمین آب برای مصارف خانگی، محیط‌زیست، صنعت و کشاورزی به مدت ۶ سال بدون کمبود ممکن خواهد بود و در بدبینانه‌ترین شرایط در مورد تقاضای آب همه بخش‌ها، بعد از سال ۲۰۲۲ کمبود آب در این بخش‌ها وجود خواهد

داشت. در صورت اعمال مدل الگوی کشت بهینه، در شرایط خوش‌بینانه، تقاضای همه بخش‌ها تا سال ۲۰۳۰ بدون هیچ کمبودی و در شرایط بدبینانه، تقاضا به مدت ۴ سال تأمین و آب موردنیاز همه بخش‌ها به‌طور کامل تأمین خواهد شد. این نشان می‌دهد که عملکرد سد در دوره آینده به دلیل تغییرات اقلیمی و کاهش جریان ورودی به مخزن ناپایدار خواهد بود.

منابع

شاهرخی ساردو، م. و جلال کمالی، ن. ۱۴۰۰. مدل پویایی سیستم مدیریت بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و عملکرد تغذیه مصنوعی (مطالعه موردی دشت نسا بم، کرمان). مجله پژوهش آب ایران. ۱۵(۲): ۱۱۸-۱۰۹.

فتوکیان، م.ر.، صفاری، ن. و ضرغامی، م. ۱۳۹۶. مدلسازی پویای سیستم سد مخزنی یامچی با اعمال الگوی بهینه کشت جهت تدوین سیاست بهره برداری. تحقیقات منابع آب ایران، ۳(۱۳): ۱۶-۱.

کیومرث روشنگر، ک.، قاسمپور، ر.، ثاقبیان، س.م. ۱۳۹۹. بررسی مقایسه ای پارامترهای تاثیرگذار بر میزان استهلاک انرژی در کانال‌های با مقاطع مختلف بر اساس روش آنالیز فاکتوریل و روش هوشمند. نشریه آبیاری و زهکشی، ۱(۱۴): ۲۱۶-۲۰۵.

Ahmadi, M., Haddad, O.B. and Loáiciga, H.A. 2015. Adaptive reservoir operation rules under climatic change. Water Resources Management. 29: 1247–1266.

Baron, J.S., Poff, N.L., Angermeier, P.L., Dahm, C.N., Gleick, P.H., Hairston, N.G., Jackson, R.B., Johnston, C.A., Richter, B.G. and Steinman, A.D. 2002. Meeting ecological and social needs for fresh water. Ecological Applications. 12(5), 1274-1260.

Chen, J., Shi, H., Sivakumar, B., Peart, M.R. 2016. Population, water, food, energy and dams. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 56: 18–28.

Croke, B. F.W. and Jakeman, A.J. 2008. Use of the IHACRES rainfall-runoff model in arid and semi arid regions. Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 41–48.

Ehteram, M., Mousavi, S.F., Karami, H., Farzin, S., Singh, V.P., Chau, K.W. and El-Shafie, A. 2018. Reservoir operation based on evolutionary algorithms and multi-criteria decision-making under climate change and uncertainty. Journal of Hydroinformatics. 20: 332–355.

Forrester, J.W. 2007. On the history, the present and the future of system dynamics. System Dynamics Review. 23(2-3): 157–189.

Hakami-Kermani, A., Babazadeh, H., Porhemmat, J., Sarai-Tabrizi, M. 2020. An uncertainty assessment of reservoir system performance indices under the climate change effect. Ain Shams Engineering Journal. 11: 889–904.

Jackson, R.B., Carpenter, S.R., Dahm, C.N., Mcknight, D.M., Naiman, R.J., Postel, S.L. and Running, S.W. 2001. Water in a changing word. Ecological Applications. 11(4): 1027-1045.

Lee, J. and Shin, H. 2021. Assessment of future climate change impact on an agricultural reservoir in South Korea. Water. 13: p.2125.

Littlewood, I., Clarke, R., Collischonn, W. and Croke, B.F. 2007. Predicting daily streamflow using rainfall forecasts, a simple loss module and unit hydrographs: two Brazilian catchments. Environmental Modelling & Software. 22: 1229–1239.

Littlewood, I., Clarke, R., Collischonn, W. and Croke, B.F. 2007. Predicting daily streamflow using rainfall forecasts, a simple loss module and unit hydrographs: two Brazilian catchments. Environmental Modelling and Software. 22: 1229–1239.

Loucks, D. P. and vanBeek, E. 2005. Water Resources Systems Planning and Management-Exercises. United Nation Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, France.

McMahon, T.A., Adeloye, A.J. and Zhou, S.L. 2006. Understanding performance measures of reservoirs. Journal of Hydrology. 324: 359-382.

Ranzani, A., Bonato, M., Patro, E.R., Gaudard, L. and De Michele, C. 2018 Hydropower future: between climate change, renewable deployment, carbon and fuel prices. Water. 10: p.1197.

Salman, S.A., Shahid, S., Afan, H. A., Shiru, M.S., Al-Ansari, N. and Yaseen, Z.M. 2020. Changes in climatic water availability and crop water demand for Iraq region. Sustainability. 12: 3437.

Simonovic, S.P. and Ahmad, S. 2002. System dynamics modeling of reservoir operation for management. Journal of Computing in Civil Engineering. 14(3): 190-198.

Sterman, J. 2002. System Dynamics: Systems Thinking and Modeling for A Complex World. MIT Press, Cambridge, MA.

Traynham, L., Palmer, R. and Polebitski, A. 2011. Impacts of future climate conditions and forecasted population growth on water supply systems in the Puget Sound Region. Journal of Water Resources Planning and Management. 137: 318-326.

Wins, I., Breierly, G. and Trowsdale, S. 2009. The use

Zamani, R., Akhond-Ali, A.M., Ahmadianfar, I. and Elagib, N.A. 2017. Optimal reservoir operation under climate change based on a probabilistic approach. Journal of Hydrologic Engineering. 22: 05017019.

Zarghami, M., Fotookian, M.R., Safari, N. and Aslanzadeh, A. 2016. Reservoir operation using system dynamics under climate change impacts: a case study of Yamchi reservoir, Iran. Arabian Journal of Geosciences. 9: 1-13.

of system dynamics simulation in water resources management. Springer Science. 23: 1301-1323.

Wu, G., Li, L., Ahmad, S., Chen, X. and Pan, X. 2013. A dynamic model for vulnerability assessment of regional water resources in arid areas: a case study of Bayingolin, China. Water Resources Management. 27: 3085-3101.

Yang, X.S. and He, X. 2013. Firefly algorithm: recent advances and applications. International journal of swarm intelligence. 1(1): 36-50.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 5, Vol. 19, Dec.-Jan. 2026, p. 841-855

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۹، آذر - دی ۱۴۰۴، ص. ۸۵۵-۸۴۱

Investigating the Efficiency of the System Dynamics Model in the Performance of the Zounuz Dam Reservoir Considering Climate Change Scenarios

R. Ghasempour[1*], M.T. Aalami[2], S.M. Saghebian[3]
Recived: May.10, 2025 Accepted: Aug.30, 2025

Abstract

In this study, the effects of climate change scenarios on the Zounuz Dam were investigated, considering the reliability, vulnerability, resilience, sustainability, and scarcity indicators. Climate projections for the period 2021–2040 were downscaled using the CanESM2 general circulation model under various RCP scenarios, applying the Firefly Algorithm (FA) method. The IHACRES model was used to simulate the inflow to the dam. Also, the flow-storage model was created using the Vensim software. The results indicated that inflow to the dam is projected to decline by 12%, 30%, and 32% under the RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios, respectively. The crop pattern optimization was investigated. The results showed that if the optimal cultivation pattern is applied in different climate scenarios, water supply will not be difficult in the next 10, 4, and 4 years, respectively, but after that, water shortages will gradually appear. The findings showed that although the implementation of the optimal cultivation pattern improves the five indicators in all water consumption sectors, the dam reservoir will not be able to meet future demands. Therefore, it is essential to adopt practical policies and methods for water resource management in all sectors.

Keywords: Climate Change, Firefly Algorithm, Optimization, System Dynamics, Vensim

1- Ph. D, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
2- Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
3- Assistant Professor, Department of Civil Engineerin, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran
(*- Corresponding Author Email: r.ghasempour@tabrizu.ac.ir)