نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و پنجم، شماره پنجم، ۱۳۹۷
http://jwsc.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/jwsc.2018.12334.2691

بررسی دقت روش پویایی سیستم در شبیه‌سازی و بهینه‌سازی منحنی فرمان مخزن سد (مطالعه موردی: سد چغاخور)

حامد نوذری[۱]* و مریم وفایی[۲]

[۱]دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان، [۲]دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۰/۱٤ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۷/۱۷

چکیده

سابقه و هدف: افزایش تقاضای آب و منابع آب محدود در مناطق‌خشک و نیمه‌خشک، مدیریت و برنامه‌ریزی جهت استفاده بهینه از منابع آب را ضروری و لازم ساخته است. از سوی دیگر منابع آب‌سطحی در ایران سهم عمده‌ای در تأمین نیاز آبی بخش‌های مختلف شرب، کشاورزی و صنعت دارد. در همین راستا، مدیران جهت برنامه‌ریزی منابع آب به‌خصوص مخازن سدها، نیاز به اتخاذ سیاست‌های بهینه دارند. از این‌رو تلاش‌های زیادی به‌منظور توسعه مدل‌های کامپیوتری در بخش مذکور صورت گرفته است. یکی از روش‌های بسیار مؤثر برای بررسی وضعیت سیستم‌ها، روش پویایی سیستم می‌باشد که یکی از روش‌های قدرتمند و بصری شبیه‌سازی است. مدل‌هایی که با این روش نوشته می‌شوند با بینش فرآیندهای بازخورد، کاربران سیستم را به فهم بهتری از رفتار دینامیکی سیستم‌ها در طول زمان نایل می‌سازند. اما VENSIM یک ابزار مدل‌سازی بصری است که این امکان را می‌دهد تا بتوان مدل‌های سیستم‌های پویا را مفهوم‌سازی، شبیه‌سازی، تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی کرد. بنابراین در این پژوهش به‌منظور بهینه‌سازی منحنی فرمان عملکرد سد چغاخور از روش‌های پویایی سیستم و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر هوش تجمعی PSO استفاده شد. در نهایت دقت عملکرد این روش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها: منطقه مورد مطالعه در نزدیکی شهر بروجن واقع گردیده است. سد چغاخور خاکی بوده و آب آن عمدتاً از طریق نزولات جوی و چشمه‌ها تأمین می‌شود. در این پژوهش نتایج با داده‌های ماهانه جمع‌آوری‌شده در یک دوره ۱۰ ساله (۱۳۹۳-۱۳۸۳) از سد چغاخور مقایسه می‌شوند. روابط بین جریان ورودی، حجم ذخیره مخزن و میزان رهاسازی هر دوره تعیین و با استفاده از روش پویایی سیستم در محیط VENSIM و با استفاده از روش فراکاوشی PSO در محیط MATLAB 2013 تعریف شدند. تابع هدف و محدودیت‌ها برای هر دو مدل یکسان می‌باشد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد مقدار ضریب تعیین که بیانگر همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده توسط روش پویایی سیستم و داده‌های مشاهده‌ای می‌باشد در حجم مخزن برابر ۰/۹۹۵ و برای میزان رهاسازی مخزن سد برابر با ۰/۹۹۱

* مسئول مکاتبه: hanozari@yahoo.com

می‌باشد. پس از بهینه‌سازی، اختلاف بین نیاز پایین‌دست و مقادیر رهاسازی‌شده کاهش یافت و باعث کاهش هدررفت آب شد. میزان این اختلاف برای روش پویایی سیستم برابر با ۱۱/۷۸ میلیون مترمکعب و برای روش PSO برابر با ۱۸/۸۲ میلیون مترمکعب بود. این در حالی است که در شرایط واقعی این اختلاف برابر با ۲۵/٦۸ میلیون مترمکعب بوده است.

نتیجه‌گیری: مقایسه نتایج شبیه‌سازی و داده‌های مشاهده‌ای نشان داد که پویایی سیستم می‌تواند با دقت بسیار بالایی میزان تغییرات حجم آب پشت مخزن سد چغاخور را شبیه‌سازی نماید. هم‌چنین تلفیق روش شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در محیط VENSIM می‌تواند دقت بهینه‌سازی را تا حد قابل‌قبولی افزایش دهد. به‌گونه‌ای که در بهینه‌سازی منحنی‌فرمان سد چغاخور، این روش از دقت بیش‌تری نسبت به الگوریتم PSO برخوردار است. بنابراین مدل پویایی سیستم می‌تواند روش مفید و کاربردی در مدیریت منابع آب مخازن باشد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم PSO، بهینه‌سازی، پویایی‌سیستم، سد چغاخور، منحنی‌فرمان سد

مقدمه

افزایش جمعیت، محدودیت منابع غیریکنوخت و هم‌چنین استفاده بی‌رویه از این منابع محدود، از جمله مسائل مهم مطرح در حوضه‌های مختلف زندگی بشر می‌باشد. منابع آب سطحی در ایران سهم عمده‌ای در تأمین نیاز آبی بخش‌های مختلف شرب، کشاورزی و صنعت دارد. در سال‌های اخیر افزایش جمعیت، رشد تقاضا، محدودیت منابع آب و هزینه‌های کلان تأمین آب، با اجرای طرح‌های جدید توسعه منابع آب، موجب توجه بیش‌تر به مدیریت بهره‌برداری از منابع و امکانات موجود شده است. برای بهره‌برداری بهینه از یک مخزن باید مقدار تابع هدف و متغیرهای موردنظر، جهت تأمین نیازهای طرح، بهینه گردند. به‌منظور بهره‌برداری از یک مخزن، اهداف متفاوتی مانند تأمین آب شرب، کشاورزی، محیط زیست و صنعت در مناطق پایین‌دست، تولید انرژی و کنترل سیلاب و تفریحات تعریف می‌شوند که می‌توانند در یک جهت یا خلاف جهت باشند. در این راستا، مدیران جهت برنامه‌ریزی در استفاده از منابع آب به‌خصوص مخازن سدها، نیاز به گرفتن تصمیم‌های بهینه دارند. برای بسیاری از مدل‌های مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی غیرخطی الگوریتمی به‌عنوان راه‌حل پیشنهاد می‌شود. هم‌چنین ویه و همکاران (۲۰۱۲) در گزارشی برای ارزیابی اثرات اجتماعی و اقتصادی در سطوح مختلف تخصیص جریان زیست‌محیطی در حوضه رودخانه ویه در چین از مدل دینامیک سیستم‌ها و نرم‌افزار VENSIM استفاده نمودند. در این گزارش از چهار روش برای رشد اجتماعی و اقتصادی و چهار روش برای تخصیص آب زیست‌محیطی ارائه دادند. نتایج نشان داد که مدل توسعه‌یافته پویایی‌سیستم عملکرد خوبی در برابر رفتار دینامیکی سیستم در منطقه مورد مطالعه دارد (۲۷). حسن‌زاده و همکاران (۲۰۱٤) پژوهشی با عنوان مدیریت آب در سیستم‌های پیچیده، مدل جامع منابع آب برای ساسکاچوان کانادا انجام دادند. در این پژوهش مدل جامع منابع آب منطقه شامل زیربخش آبیاری که برای پیش‌بینی پویای نیاز آبی، تبخیر و تعرق پتانسیل و زیربخش اقتصادی مدل برای پیش‌بینی ارزش آب با مدل پویایی‌سیستم به‌کار برده شد (۵). نیازی و همکاران (۲۰۱٤) مدل پویایی

سیستم را برای حفظ منابع آب در منطقه خشک از طریق ذخیره و بازیافت آب آبخوان در ارتباط با سد با در نظر گرفتن چارچوب مدل‌سازی توسعه منطقه‌ای، از جمله (ذخیره‌سازی آبخوان و بازیابی) ASR و طراحی سد را با روش پویایی سیستم برای منطقه سیریک ایران توسعه دادند. مدل پویایی سیستم جریان آب‌های زیرزمینی و مدل پویایی سیستم جامع توسعه‌یافته در این مطالعه نشان داد ASR یک استراتژی سودمند برای کشاورزان منطقه و سیستم آب‌های زیرزمینی است، از آن‌جا که میزان دبی آب‌های زیرزمینی به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است. به این نتیجه رسیدند مدل پویایی‌سیستم پیشنهادی، یک ابزار مؤثر برای کمک به حفظ منابع آب و کاهش تخلیه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (۲۱). ویه و همکاران (۲۰۱٦) در پژوهشی مدیریت آب شهری را با روش پویایی سیستم برای شبیه‌سازی تعاملات پویا بین نیازهای آب شهری و جامعه، اقتصاد، آب و هوا و حفاظت آب در منطقه ماکو، چین پیشنهاد دادند. نتایج شبیه‌سازی برای ماکو نشان داد میزان جمعیت، نیروی اصلی برای تقاضای آب شهری بوده است. خروجی تقاضای آب به تغییر جمعیت، نیاز سرانه و درجه حرارت حساس است. افزایش بارش موجب کاهش تقاضای آب شهری خواهد شد و رشد اقتصادی موجب افزایش تقاضای آب خواهد شد (۲۸). کوتیر و همکاران (۲۰۱٦) با طراحی سه سناریوی توسعه زیرساخت‌های آب، توسعه کشت گندم و شرایط خشک مدیریت منابع آب و توسعه کشاورزی را در حوضه آبریز رودخانه ولتا در کشور غنا با بهره‌گیری از رویکرد پویایی سیستم مطالعه نمودند. در این مطالعه یک مدل شبیه‌سازی پویایی سیستم به‌عنوان یک ابزار یادگیری برای درک بهتر از پویایی درازمدت رودخانه ولتا و به‌عنوان مبنایی برای بررسی سناریوهای سیاست جایگزین برای مدیریت منابع پایدار آب و توسعه کشاورزی توسعه داده شد. نتایج نشان داد که خروجی‌های شبیه‌سازی‌شده با واقعیت مشاهده شده سیستم هم‌خوانی دارد. تجزیه و تحلیل حساسیت نیز نشان داد که مدل در عدم قطعیت در پارامترهای اصلی قابل اعتماد و قوی است (۱۲). هم‌چنین ناصری و همکاران (۲۰۱۷) به مدیریت آب با استفاده از مدل‌سازی پویایی سیستم در مناطق نیمه‌خشک پرداختند. این مطالعه با هدف توسعه یک مدل پویایی سیستم برای شناسایی نوسانات و بهره‌برداری از سطح آب‌های زیرزمینی پایدار دشت تبریز و هم‌چنین برای تعیین میزان عرضه و کسری مصرف در صنعت شهری و کشاورزی با در نظر گرفتن راهکارهای مختلف مدیریت آب صورت گرفت. روش پویایی سیستم نشان داد که اگر سیاست مدیریت فعلی ادامه یابد، کاربران در آینده با بحران عرضه آب برای استفاده‌های مختلف مواجه خواهند شد. برای جلوگیری از بحران باید افزایش بهره‌وری کشاورزی، کاهش بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و شستشوی مصنوعی در دشت تبریز مورد توجه قرار گیرد (۲۰). در ایران نیز پژوهش‌های گسترده‌ای با استفاده از روش پویایی سیستم انجام شده است. برای مثال صلوی‌تبار (۱۳۸٦) مدل منابع و مصارف آب شهری تهران با روش پویایی سیستم برای ارزیابی روند منابع و مصارف و عوامل اثرگذار بر آن تهیه و توسعه دادند. اندرکنش منابع آب شهری با جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی عرضه و تقاضای آب، سیستم پیچیده‌ای را ایجاد می‌کند که تحلیل آن صرفاً با نگرشی جامع و با روش پویایی سیستم‌ها مقدور می‌باشد (۲٤). در پژوهش ناصری و همکاران (۱۳۸۸) مدلی مبتنی بر روش پویایی‌سیستم از آبخوان پایاب سد شهرچای در

ارومیه توسعه داده شد. در آن مدل، رابطه بین تقاضا و تأمین آب شرب، صنعت و کشاورزی از هر دو منبع آب سطحی و زیرزمینی، سیستم پیچیده‌ای را ایجاد نموده بود. نتایج اجرای مدل سیستم پویا برای آبخوان پایاب سد شهرچای نشان داد که اگر سیستم جمع‌آوری فاضلاب در شهر ارومیه اجرا شود و فاضلاب به صفر برسد، همین‌طور کل آب شرب از آب مخزن تأمین گردد و راندمان آبیاری هم به ٤١ درصد برسد به مقدار زیادی از ذخیره آب زیرزمینی کاسته می‌شود (۱۹). هم‌چنین در پژوهش نوذری و همکاران (۱۳۹۲) به کاربرد روش پویایی‌سیستم در شبیه‌سازی الگوی کشت شبکه آبیاری و زهکشی سمت راست آبشار اصفهان پرداخت. نتایج نشان داد در صورت حفظ و عدم حفظ محدودیت مجموع مساحت زیرکشت در سال مبنا، بیش‌ترین مقدار درآمد به هزینه را دارد (۲۲). جهان‌دیده و همکاران (۱۳۹۳) در گزارشی از مدل پویایی سیستم در شبیه‌سازی تولید برق در مخازن برق آبی کارون ۱، کارون ۳ و کارون ٤ با نرم‌افزار VENSIM استفاده نمودند. مراحل طراحی شامل تعریف متغیرهای تصمیم، معادلات و فرمول‌های لازم برای محاسبه تولید انرژی مخازن بود. نتایج نشان می‌دهد که می‌توان تولید انرژی در مخزن خرسان ۱ که شامل مخزن کارون ٤ و ۳ می‌باشد به‌صورت میانگین ۲۰٪ افزایش داد بدون این‌که در معیارهای ارزیابی تغییرات قابل‌توجهی داشت (۷).

میثاقی و همکاران (۱۳۹٤) در مدیریت منابع آب در سطح حوضه آبریز، اجزای درونی هر سیستم و نیز اندرکنش سیستم‌های مختلف با یکدیگر به‌طور فراگیر در نظر گرفت. که این پژوهشگر به مدل‌سازی منابع آب در حوضه آبریز با استفاده از روش پویایی سیستم در نیشابور پرداخت در نهایت سیاست‌های مبتنی بر سناریوهای پیشنهادی توسط مدل اجرا گردید و از نتیجه قابل‌قبولی برخوردار بود (۱۷). در مطالعه دیگر کدخداحسینی و همکاران (۱۳۹٤) به ارزیابی تخصیص منابع آب سد چغاخور با استفاده از رویکرد پویایی‌سیستم پرداختند. در این مطالعه تخصیص منابع آب سد چغاخور برای تأمین نیازهای کشاورزی و زیست‌محیطی و به‌ترتیب اولویت نیاز کشاورزی و زیست‌محیطی در خلال سال‌های ۹۳-۷٦ با استفاده از مدل پویایی سیستم VENSIM مدل‌سازی و همه عواملی که در رابطه علت و معلولی بیلان سد و نیازهای موردنظر هستند مورد بررسی قرار گرفته است. پس از شبیه‌سازی سد نتایج نشان می‌دهد که این سد تنها ۳۳ درصد از نیاز کشاورزی و ٦۹ درصد از نیاز زیست‌محیطی منطقه را تأمین کرده است و نیاز به برنامه مدیریتی جامع برای رفع مشکل کمبود آب دارد (۸). کدخداحسینی و همکاران (۱۳۹٤) به تعیین عملکرد سد چغاخور در تأمین نیازهای پایین‌دست با استفاده از مدل VENSIM پرداختند. بنابراین به‌منظور تأمین و عرضه آب با اطمینان‌پذیری بالا و رعایت اولویت‌های تخصیص به‌صورت شرب، محیط‌زیست، صنعت و کشاورزی نیاز به برنامه‌های دقیق و کامل می‌باشد. از این‌رو در این پژوهش از تحلیل پویایی سیستم به‌عنوان راهکاری مناسب که دارای یک دیدگاه جامع است استفاده شده است (۹). هم‌چنین در پژوهشی دیگر کدخداحسینی و همکاران (۱۳۹٦) به ارزیابی سناریوهای مختلف تخصیص منابع آب سد چغاخور با استفاده از روش پویایی سیستم پرداختند. به‌منظور بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سد چغاخور برای تأمین نیازهای پایین‌دست مدل پویایی سیستم VENSIM طراحی و اجرا گردید و هم‌چنین مقادیر ورودی به مخزن سد و تبخیر از مخزن سد با استفاده از مدل سری زمانی SARIMA برای پنج سال آینده پیش‌بینی شد. نتایج مدل نشان داد سد چغاخور در

بهینه‌ترین حالت توانایی تأمین نیاز آبی ۱۶۰۰ هکتار از اراضی آبخور را دارد که در این حالت میزان تأمین نیاز کشاورزی و زیست‌محیطی به‌ترتیب ۸۳ و ۹۵ می‌باشد (۱۰).

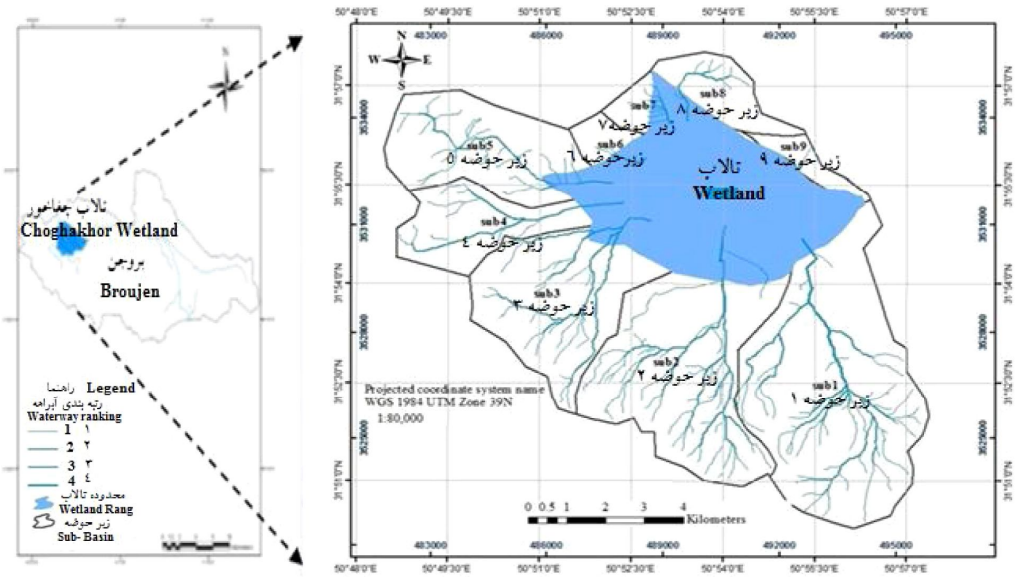
مطالعات انجام‌شده با استفاده از الگوریتم (PSO)[1] عبارت‌اند از: مایر و همکاران (۲۰۰۳) با استفاده از الگوریتم PSO، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم جامعه مورچگان در بررسی بهینه‌سازی شبکه جمع‌آوری فاضلاب به این نتیجه رسیدند که الگوریتم PSO می‌تواند با تعداد کم‌تر و سرعت بالاتری به جواب بهینه برسد (۱۵). مهدی‌پور و همکاران (۱۳۸۷) به استخراج منحنی‌فرمان بهره‌برداری مخزن دز با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO در مقایسه با روش برنامه‌ریزی خطی پرداختند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که با پیچیده‌ترین مسأله، PSO توانایی بالاتری در رسیدن به راه‌حل‌های بهینه برای سیاست بهره‌برداری بهینه از مخزن سد را دارد. به‌خوبی این الگوریتم قادر به تأمین نیاز آبی پایین‌دست بوده و حجم بهینه مخزن در حد مطلوب محاسبه شده است (۱۶). در پژوهش مفتاح‌هلقی و همکاران (۱۳۹۰) استخراج منحنی سد گلستان با استفاده از الگوریتم ژنتیک و PSO را مورد مطالعه قرار گرفته شد. نتایج نشان داد الگوریتم PSO توانایی خوبی در بهره‌برداری سیستم دارد (۱۳). هم‌چنین حجتی و همکاران (۱۳۹۲) به‌منظور بهینه‌سازی یک سامانه دو مخزنه با اهداف حداکثر کردن در آمد حاصل از فروش انرژی نیروگاه و افزایش حجم ذخیره سیلاب در حوضه آبریز قزل‌اوزن، از الگوریتم‌های ژنتیک ساده، چندهدفه و الگوریتم فراکاوشی بهینه‌سازی ازدحام ذرات PSO استفاده کردند. نتایج نشان داد الگوریتم‌های فراکاوشی توانسته‌اند جواب قابل‌قبولی را برای مسأله بهینه‌سازی مخازن ارائه نمایند (۶). در مطالعه‌ای دیگر مقدم و همکاران (۱۳۹۲) به کاربرد یک الگوریتم اصلاح‌شده بهینه‌سازی ازدحام ذرات در طراحی سیستم‌های توزیع آب پرداختند. طراحی بهینه سیستم‌های توزیع آب به‌عنوان یک مسأله واقعی بهینه‌سازی مطرح شد، که هدف آن یافتن بهترین راه‌حل برای انتقال آب از مخزن به مصرف‌کنندگان بود به‌نحوی تمام نیازهای آن‌ها با کم‌ترین هزینه تأمین شد (۱۸). در مطالعه فریدحسینی (۱۳۹۴) پژوهش بر روی واسنجی خودکار مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS با استفاده از روش فراکاوشی PSO انجام داده شد. که این مطالعه بر روی حوزه آبریز سد کاره بود. نتایج حاصه بیانگر اهمیت تابع هدف و حداقل‌سازی خطای پیش‌بینی مدل‌های تک هدفه را در برداشت (۴).

با توجه به موارد فوق و ضرورت شرایطی که بتوان به‌سمت مدیریت جامع و یکپارچه از سیستم‌های تک‌مخزنی دست یافت، ارائه سیاست‌هایی که بتواند بهره‌برداری را جهت اخذ تصمیم مناسب جهت رهاسازی بهینه آب از سیستم‌های تک‌مخزنه هدایت نماید، ضروری می‌باشد. بنابراین در پژوهش حاضر به‌منظور بهره‌برداری بهینه و مدیریت صحیح آب پشت مخزن جهت تأمین نیازهای کشاورزی، شرب، صنعت و محیط‌زیست، از تلفیق شبیه‌سازی مخزن سد به روش پویایی‌سیستم و بهینه‌سازی منحنی فرمان آن در نرم‌افزار VENSIM استفاده و نتایج با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات PSO مقایسه شد. لازم به ذکر است بیش‌تر پژوهش‌های صورت‌گرفته در نرم‌افزار VENSIM جهت شبیه‌سازی بوده است، در حالی‌که استفاده از قابلیت بهینه‌سازی آن می‌تواند جهت اتخاذ سیاست‌های بهینه مؤثر باشد. بنابراین نتایج مقایسه دو روش شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در این مطالعه می‌تواند در تأمین نیازهای شرب کشاورزی، محیط‌زیست و صنعت به‌صورت جامع مفید واقع گردد.

1- Particle Swarm Optimization Algorithm

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه: سد چغاخور در محدوده تقریبی ۳۱ درجه و ٥٦ دقیقه تا ٥٤ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۵۲ دقیقه تا ٥٦ دقیقه طول شرقی و با مساحت دریاچه حدود ۲۳۰۰ هکتار قرار گرفته است. منطقه مورد مطالعه در نزدیکی شهر بروجن در بخش بلداجی در استان چهارمحال و بختیاری واقع گردیده است که در ۱ نشان داده شده است. منابع آبی سد عمدتاً از طریق نزولات جوی و چشمه‌های حاشیه کوه‌کلار تأمین می‌شود که در بهترین شرایط و موقعیت بارندگی، عمق آب تالاب به ۳ متر می‌رسد. این ناحیه، آب و هوایی معتدل و زمستان‌هایی سرد دارد. میانگین بارش سالانه ٥٤٧/٧ میلی‌متر است که بیشترین میزان متوسط بارش ۱۱۳/۱ میلی‌متر در آذرماه می‌باشد. براساس مطالعات هواشناسی منطقه، میانگین دمای هوا در این منطقه در گرم‌ترین ماه‌های سال ۲۱ درجه سانتی‌گراد و در سردترین ماه‌های سال به ٦ درجه زیر صفر هم می‌رسد و متوسط ارتفاع تبخیر سالانه از سطح آزاد آب ۱۳٤۷/٦ میلی‌متر می‌باشد (۲). میزان آبدهی بلندمدت سالانه در محل محور سد چغاخور برابر ٤٦/۳ میلیون مترمکعب در سال است. هم‌چنین برای حفظ حیات تالاب حداقل نیاز زیست‌محیطی تالاب حدود ۵ میلیون مترمکعب می‌باشد. یکی از نیازهای دیگر منطقه نیاز کشاورزی می‌باشد، این سد در منطقه با هدف تأمین ۸۰۰۰ هکتار نیاز آبی اراضی کشاورزی منطقه احداث شده است که میزان آب مورد نیاز برای کشاورزی، سالانه برابر ۹۱۱٦ مترمکعب در هکتار است (۱۰).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه تالاب چغاخور.

Figure 1. The position of study area in Chaghakhor wetland.

این سد از جنس سد خاکی با هسته رسی می‌باشد که از سال ٧٦ بهره‌برداری شده است. طول تاج سد ۱۱۰۰ و عرض آن ١٤ متر می‌باشد. مساحت دریاچه ۱۳۰۰ هکتار می‌باشد (۱). آمار و اطلاعات ماهانه دبی ورودی به مخزن و میزان تبخیر و بارش منطقه در طی دوره ۱۳۸۳-۱۳۹۳ از شرکت‌های آب منطقه‌ای و

سازمان هواشناسی اخذ گردید. در این پژوهش به‌منظور بررسی میزان خروجی آب از سد از آمار و اطلاعات ایستگاه هیدرومتری پل‌ماری در خروجی سد و جهت محاسبه میزان تبخیر و بارش در منطقه از آمار و اطلاعات ایستگاه هواشناسی آورگان در نزدیکی محل سد استفاده شد. جهت برآورد کمی نیاز زیست‌محیطی سد چغاخور نیز از روش مونتانا استفاده گردید (۱۱). برآورد نیاز زیست‌محیطی حوضه آبریز در هر بازه ضروری است. با توجه به این‌که هنوز سازمان حفاظت محیط‌زیست به‌عنوان متولی امر حفاظت از محیط‌های طبیعی و اکوسیستم‌های آبی کشور روش مناسب و منطبق با شرایط اکولوژیکی کشور جهت تعیین نیاز زیست‌محیطی پیکره آبی کشور ارائه نداده، در حال حاضر روش مونتانا به‌عنوان بهترین روش موجود توسط طراحان جهت تعیین نیاز زیست‌محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۱). در جدول ۱ حداقل نیاز زیست‌محیطی به روش مونتانا مشاهده می‌شود.

جدول ۱- حداقل نیاز زیست‌محیطی به روش مونتانا (۱۱).

Table 1. Minimum environmental requirements in Montana method (11).

کیفیت حیات ماهی در رودخانه Quality fish life in the river	سهم میانگین سالانه رودخانه (درصد) The average annual share of the river (percent)	
دوره Period	فروردین تا شهریور April to May	مهر تا اسفند October to March
وضعیت بهینه Optimized condition	100-60	100-60
بسیار عالی Excellent	40	60
عالی High	30	50
خوب Good	20	40
قابل قبول acceptable	10	30
ضعیف Weak	10	10
کمبود شدید Acute shortage	10<	10<

روش پویایی سیستم: مدل پویایی سیستم، مدل‌های ریاضی علت و معلولی هستند که فرض اساسی آن‌ها شبیه‌سازی و در نتیجه قابل پیش‌بینی بودن رفتار یک سیستم در صورت ارائه دقیق ساختار آن می‌باشد. اولین گام در هر پروژه مدل‌سازی SD تعیین ساختار سیستم شامل نوع رابطه بین متغیرها، حلقه‌های بازگشتی، ساختارهای تیپ سیستم و تأخیرها است. به این ترتیب مشاهده رفتار یک سیستم براساس یک طرح از پیش برنامه‌ریزی‌شده امکان‌پذیر می‌گردد. به‌علاوه، رفتار آینده سیستم از روی مدل طراحی شده قابل پیش‌بینی و تعیین می‌باشد. از نظر علمی مدل‌های ریاضی یک ارائه آگاهانه‌تر از مسائلی هستند که با آن‌ها مواجه هستیم. اما شبیه‌سازی پویا به ما امکان می‌دهد که رفتار یک سیستم مدل‌سازی شده و پاسخ آن به هرنوع تغییر در طی زمان را مشاهده کنیم. مدل‌های شبیه‌سازی پویا شامل معادلاتی هستند که تغییرات پویا را شبیه‌سازی می‌کنند. اگر حالت سیستم در یک زمان خاص مشخص باشد، حالت سیستم در فواصل زمانی بعدی را می‌توان محاسبه کرد. با تکرار این فرآیند می‌توان گام به گام در طی زمان با فواصل

زمانی دلخواه حرکت کرد. تا زمانی که مدل واقعیت را با دقت خوبی توصیف می‌کند، فرآیند مدل‌سازی و نتایج آن را می‌توان برای بهبود درک مسأله به‌عنوان یک گام لازم در جهت تغییر پایدار و مؤثر استفاده کرد. به‌علاوه شبیه‌سازی پویا این امکان را ایجاد می‌کند تا رفتار سیستم در پاسخ به هر گونه تغییر در سیاست‌های شبیه‌سازی مشاهده و برای برنامه‌ریزی در آینده تصمیم‌گیری شود (۲۳).

در حقیقت شبیه‌سازی پویا رویکردی جامع‌گرایانه است که با وجود ساده‌سازی در ارائه اجزای یک سیستم پیچیده، نتایج نزدیک به واقعیت به‌دست می‌دهد. دلیل این مسأله استفاده از روابط و قوانین فیزیکی است که در طبیعت بر سیستم‌ها حاکم هستند. برای این‌که بتوان مجموعه این عوامل پیچیده و مرتبط به هم را در کنار یکدیگر قرار داده و بین آن‌ها ارتباط برقرار کرد و چاره‌ای برای مدیریت منابع آب اندیشید، نیاز به روش‌هایی است که علاوه بر تحلیل سیستم به وجود آمده بتواند آن سیستم را شبیه‌سازی کرده و یک تقریبی از آن‌چه در واقعیت روی داده و یا روی خواهد داد ارائه نماید. علم پویایی سیستم این امکان را فراهم آورده است. مدل‌سازی و نیز شبیه‌سازی پویای تغییر در منابع آب در طی زمان، یک پایه قابل دفاع علمی برای فعال کردن استراتژی‌های مدیریت فراهم می‌کند (۲۳). این روش افزایش سرعت ایجاد یک مدل، امکان توسعه گروهی مدل‌ها و قابلیت و سادگی اصلاح مدل در واکنش به تغییرات سیستم را دارا می‌باشد (۲۹). این روش شبیه‌سازی بر پایه بازخورد و اتفاقات شیءگرا است. در روش تحلیل پویایی سیستم از چهار ابزار ذخیره، جریان، رابط‌ها وتبدیل‌کننده‌ها استفاده شده و به‌وسیله آن‌ها ذهنیت کارشناس به نمودارهای ذخیره و جریان تبدیل معطوف می‌گردد (۲۵).

روش الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO): الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، یک الگوریتم جستجوی اجتماعی است که از روی رفتار اجتماعی دسته‌های پرندگان مدل شده است. هر ذره در این الگوریتم‌ها خودمختاری نسبی دارد که می‌تواند در سراسر فضای جواب‌ها حرکت کند و باید با سایر ذرات همکاری داشته باشد گروهی از پرندگان در فضایی به‌صورت تصادفی دنبال غذا می‌گردند. تنها یک تکه غذا در فضای مورد بحث وجود دارد. هیچ‌یک از پرندگان محل غذا را نمی‌دانند. یکی از بهترین استراتژی‌ها می‌تواند دنبال کردن پرنده‌ای باشد که کم‌ترین فاصله را تا غذا داشته باشد. این استراتژی در واقع بیانگر این الگوریتم است (۳). سرعت هر ذره و موقعیت جدید آن، به‌صورت زیر تغییر می‌کند:

$$V(t+1)=wV_i(t)+C_1r_1\left(p_best-x_{i(t)}\right)+C_2r_2\left(g_best-x_{i(t)}\right) \quad (۱)$$

$$X_{i(t+1)} = X_{i(t)} + V_{i(t+1)} \quad (۲)$$

که در آن‌ها، vi(t+1) سرعت ذره i در تکرار جدید. Vi(t) سرعت ذره i در تکرار قبل. P_best(i) بهترین موقعیتی که ذره i تاکنون اختیار کرده است. Xi(t) موقعیت کنونی ذره. Xi(t+1) موقعیت کنونی ذره در تکرار جدید. g_best(i) بهترین موقعیت بهترین ذره (بهترین موقعیتی که تمام ذرات تاکنون اختیار کرده‌اند) است. r_1 و r_2 دو عدد تصادفی در بین صفر و یک می‌باشند، که برای حفظ تنوع و گوناگونی گروه به‌کار می‌رود. C_1 و C_2 به‌ترتیب پارامترهای شناختی و اجتماعی هستند انتخاب مقدار مناسب برای این پارامترها منجر به سرعت هم‌گرایی الگوریتم و جلوگیری از هم‌گرایی زودرس در بهینه‌سازی محلی می‌شود. انتخاب مقدار بزرگ‌تری برای پارامترهای

شناختی C_1 نسبت به پارامتر اجتماعی C_2 مناسب‌تر است اما باید همواره شرط $C_1+C_2<4$ رعایت شود. پارامتر w اینرسی وزنی نام دارد که برای هم‌گرایی در دسته ذرات می‌باشد. اینرسی وزنی جهت کنترل تأثیر سوابق سرعت‌های پیشین بر سرعت‌های جاری مورد استفاده قرار می‌گیرد بر اساس آزمایش‌های انجام شده مقدار ۰/٤، ۰/٦ برای w مناسب است. کار اصلی PSO این است که هر ذره با توجه به بهترین موقعیت مکانی خودش و موقعیت مکانی کل همسایگی‌اش که وجود دارد تنظیم می‌کنند (۳).

تابع هدف: داده‌های مورد مطالعه ۱۲۰ ماه از سال ۸۳ تا ۹۳ می‌باشد. جهت استخراج حالت بهینه بهره‌برداری از مخزن سد روابط بین جریان ورودی حجم ذخیره مخزن و میزان رهاسازی هر دوره به‌صورت پارامتریک تعریف می‌شود که مقادیر این پارامترها به‌وسیله روش‌های پویایی سیستم با نرم‌افزار VENSIM و روش فراکاوشی PSO تعیین می‌گردد. معیار اصلی مقایسه مقادیر واقعی و مشاهداتی در تابع هدف می‌باشد. تابع هدف کمینه نمودن مجموع مجذور تفاضل از نیاز در کل دوره‌ها می‌باشد. که در رابطه ۳ تابع هدف بیان شده است.

$$Min\ z=\sum_{i=1}^{120}(x-Dt)^2\Big/(D\max)^2 \qquad (۳)$$

که در آن، X_t میزان رهاسازی ماهانه، D_t میزان نیاز در هر ماه و حداکثر نیاز ماهانه D_{max} می‌باشد.

محدودیت‌ها: قیدهایی برای مخزن در نظر گرفته شده است که در رابطه‌های زیر مشاهده می‌شود:

$$S(t+1) = S(t) +I(t) - X(t) - E(t) -S_{Pill}(t) \qquad (٤)$$

$$S_{min}\leq S_t\leq S_{max} \qquad (٥)$$

$$X_{min}\leq X_t\leq X_{max} \qquad (٦)$$

$$X(t)_{min}=0 \qquad (٧)$$

که در آن‌ها، X(t) میزان آب خروجی، I(t) میزان آب ورودی، E(t) میزان تبخیر از سطح مخزن، $S_{Pill}(t)$ میزان آب سرریز، S و S_{t+1} میزان حجم ذخیره مخزن در ابتدا و انتهای دوره t می‌باشد. که تمامی واحد متغیرها بر حسب میلیون مترمکعب است. جهت استخراج حالت بهینه بهره‌برداری از مخزن سد، روابط بین جریان ورودی، حجم ذخیره مخزن و میزان رهاسازی هر دوره در روش پویایی‌سیستم در محیط VENSIM و در روش بهینه‌سازی الگوریتم ازدحام ذرات PSO تعیین می‌گردد. معیار اصلی مقایسه بین دو مدل مذکور مقادیر محاسبه شده رابطه ۳ می‌باشد.

لازم به ذکر است روش الگوریتم ازدحام ذرات PSO به‌صورت نامقید است و معمولاً مسأله بهینه‌سازی مقید می‌باشد. بنابراین به‌منظور اعمال با محدودیت‌ها (رابطه‌های ٥ و ٦) از تابع جریمه استفاده می‌شود. انتخاب و تنظیم مناسب تابع جریمه در حل سریع و دقیق مسأله نقشی اساسی دارد. برای تعریف تابع جریمه در بهینه‌سازی سه نوع تابع جریمه وجود دارد، تابع جریمه جمع‌شونده، ضرب‌شونده و حالت ترکیبی که نقطه بهینه را مشخص می‌کند. در پژوهش حاضر از تابع جریمه حالت جمع‌شونده استفاده شده است (رابطه ۸).

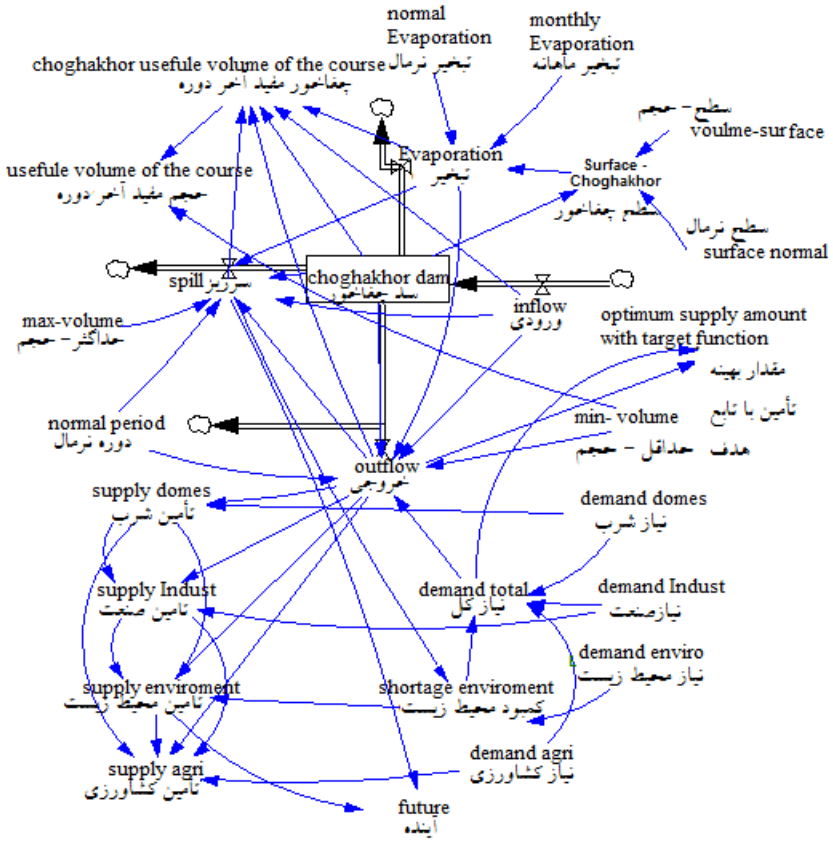
$$\acute{Z}=Z+\alpha*V \qquad \alpha>0 \qquad (٨)$$

که در آن، Z تابع هدف، v مقادیر انحراف از محدودیت‌ها و α عددی ثابت و بزرگ می‌باشد که مقادیر انحراف را به‌صورت جریمه‌ای بزرگ در تابع هدف نمایان می‌سازد. تابع جریمه باعث می‌شود نقطه بهینه‌ای که الگوریتم بهینه‌ساز پیدا می‌کند در حدود محدودیت‌های مسأله باشد (١٤).

مدل VENSIM: با توجه وجود نگرش سیستمی در مدیریت منابع آب و ویژگی پویای حوضه‌های آبریز، در این پژوهش سیستم منابع آب سد چغاخور با در نظر گرفتن رویکرد پویایی سیستم‌ها و با استفاده از محیط برنامه‌نویسی VENSIM شبیه‌سازی شده است. در شکل ۲ مدل تخصیص منابع آب سد چغاخور نشان داده شده است، که در آن حلقه‌های علت و معلولی به نمودارهای ذخیره و جریان تبدیل شده‌اند. سپس منابع و مصارف آب در این حوضه به‌طور دقیق برآورد و به نرم‌افزار VENSIM وارد شده است. جهت انجام شبیه‌سازی با نرم‌افزار VENSIM لازم است تا ابتدا ساختار مدل (تعریف متغیرهای سیستم و اتصالات و روابط بین متغیرهای مذکور) تهیه شده و پس از وارد نمودن داده‌های مربوطه در نرم‌افزار، اجرا و شبیه‌سازی مدل صورت پذیرد. با مراجعه به فایل خروجی مدل، می‌توان نتایج مدل را با نیازهای متناظر با آن‌ها مقایسه و درصدهای حجمی و زمانی تأمین نیازهای مذکور را محاسبه کرد (۱۱).

نتایج و بحث

یافته‌های روش پویایی‌سیستم: در شکل ۲ ساختار مدل تخصیص منابع آب سد چغاخور نشان داده شده است، که در آن حلقه‌های علت و معلولی به نمودارهای ذخیره و جریان تبدیل شده‌اند. در این ساختار همه منابع آب موجود و نیازها که شامل نیاز شرب، کشاورزی، زیست‌محیطی و صنعت می‌باشند، نشان داده شده است. هم‌چنین همه اجزاء بیلان مدل نیز مشخص شده‌اند.

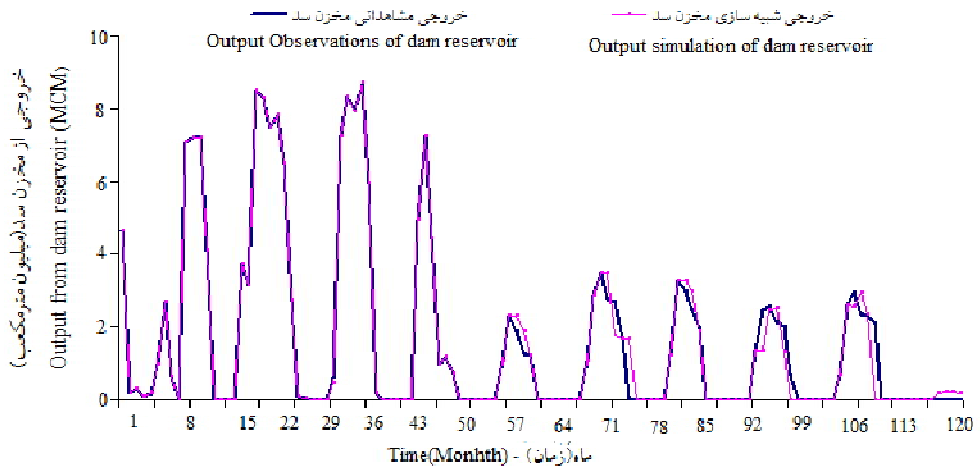


شکل ۲- ذخیره جریان سد چغاخور.

Figure 2. Save Stream Choghakhor dam.

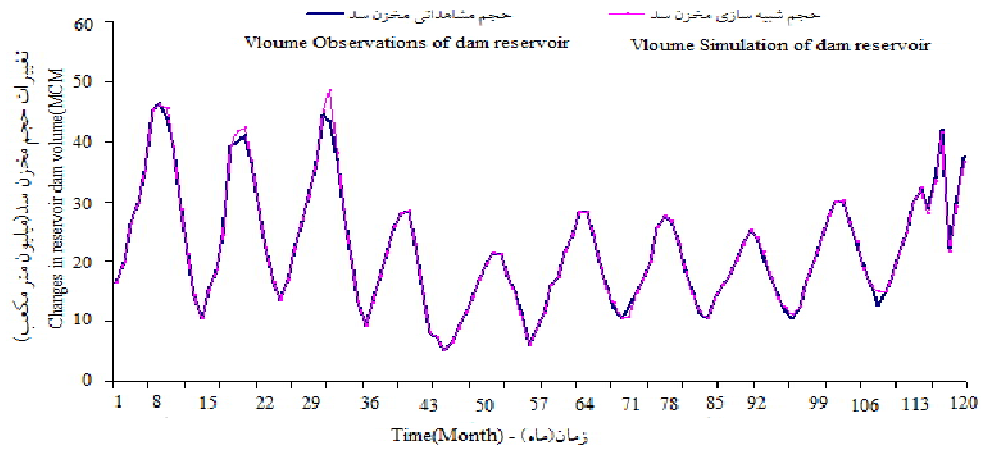
صحت‌سنجی مدل: قبل از استفاده از مدل برای تعیین و امتحان نمودن گزینه‌های سیاست‌گذاری باید نسبت به عملکرد صحیح مدل اطمینان حاصل شود. به‌طور معمول هیچ مدلی وجود ندارد که به‌صورت مطلق درست باشد. در عمل ما اکثراً به‌دنبال سودمند بودن مدل بر اساس اهداف خود هستیم تا صحت کامل آن باشیم.

در حقیقت در این بخش ما به دنبال آن هستیم تا ببینیم مدل ما تا چه حد می‌تواند اهداف مسأله را تأمین نماید و نزدیک آن باشد. صحت‌سنجی یا سودمند بودن مدل بستگی به چگونگی دید مدل‌ساز به مدل پویایی و درجه اطمینان مورد نیاز از مدل خواهد داشت. یکی از آزمون‌های مرسوم مقایسه نتایج خروجی مدل با رفتار مشاهده شده است. در این پژوهش برای صحت‌سنجی مدل از مقایسه شبیه‌سازی حجم مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده و هم‌چنین خروجی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده استفاده شده است (۲۶). در شکل‌های ۳ و ٤ نشان داده شده است و هم‌چنین شکل‌های ٥ و ٦ میزان دقت و همبستگی خروجی شبیه‌سازی با داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد.



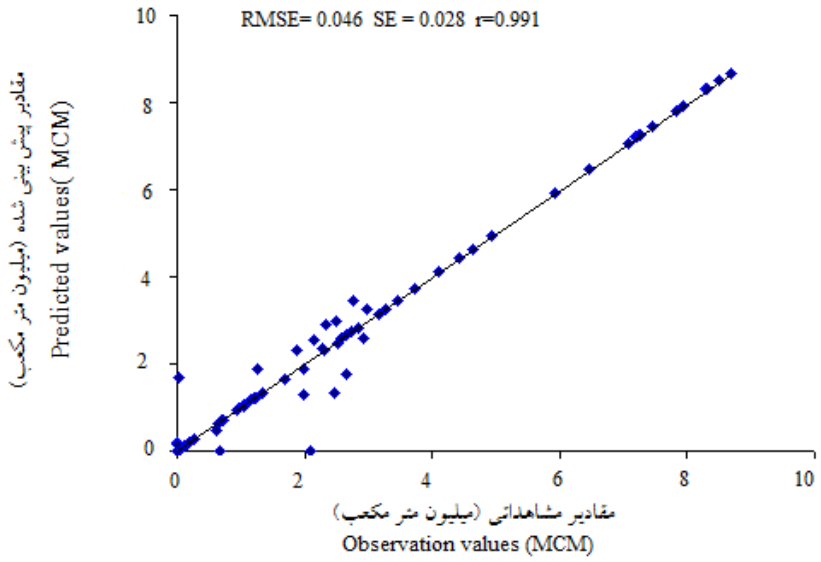
شکل ۳- مقایسه مقدار خروجی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده از مخزن سد.

Figure 3. Comparison of the observed and simulated output from the dam reservoir.



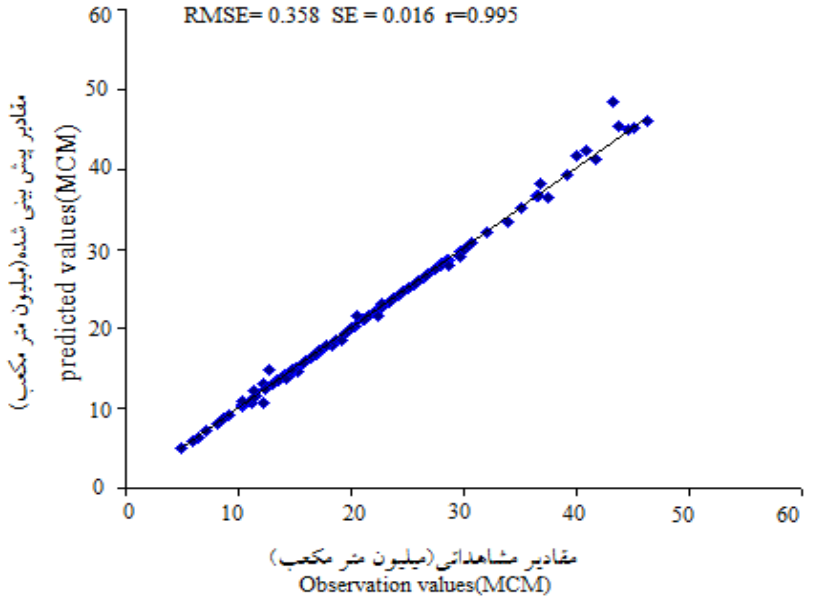
شکل ٤- مقایسه مقدار حجم مخزن مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده از مخزن سد.

Figure 4. Comparison of the observed and simulated volume from the dam reservoir.



شکل ۵- مقایسه مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده از خروجی مخزن سد.

Figure 5. Comparison of observed and simulated values from the output dam reservoir.



شکل ٦- مقایسه مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده از حجم مخزن سد.

Figure 6. Comparison of observed and simulated values from the volume dam reservoir.

با توجه به نمودارهای فوق مشاهده شد که اختلاف زیادی بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر واقعی نیست. بنابراین نتایج اعتبار مدل را تأیید می‌کند.

نتایج اجرای مدل VENSIM: پس از ایجاد ساختار مدل سد چغاخور در نرم‌افزار VENSIM و هم‌چنین جمع‌آوری و تحلیل داده‌های مورد نیاز جهت مدل‌سازی سد و شبیه‌سازی عملکرد سد توسط نرم‌افزار VENSIM انجام شده و نتایج حاصل از رفتار هر یک از متغیرهای این سد در طول دوره شبیه‌سازی که بین سال‌های آبی (۸۳-۸۲) تا (۹۳-۹۲)

می‌باشد. براساس استاندارد، نحوه بررسی تخصیص منابع آب طرح‌های توسعه منابع آب، محدوده قابل‌قبول درصدهای حجمی تأمین نیازهای مختلف به‌شرح زیر می‌باشد: نیاز شرب: درصد تأمین ۱۰۰-۹۵، نیاز محیط‌زیست: درصد تأمین ۱۰۰-۹۰، نیاز کشاورزی: در صد تأمین ۱۰۰-۸۰ و نیاز صنعت: درصد تأمین ۱۰۰-۹۰ است. اولویت‌بندی تأمین نیازها در این پژوهش به‌ترتیب برای مصارف شرب، کشاورزی، محیط‌زیست و صنعت می‌باشد. محاسبه درصدهای تأمین حجمی نیازهای مختلف برای سد چغاخور مقادیر آن در جدول ۲ آورده شده است.

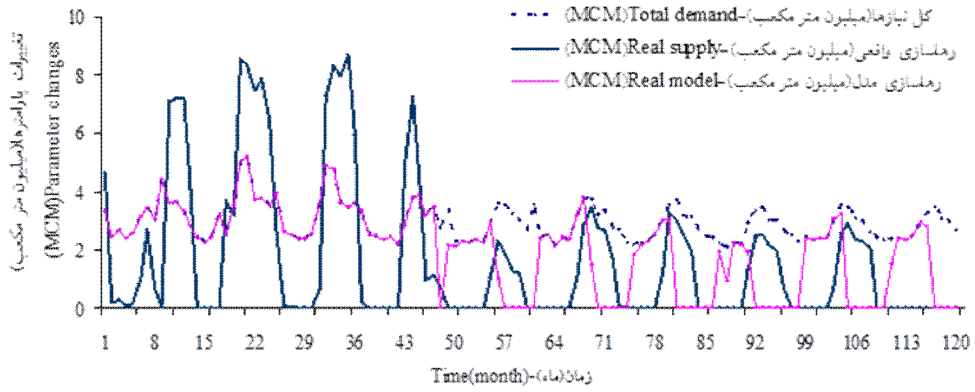
جدول ۲- مقادیر درصدهای تأمین حجمی و زمانی در طول دوره آماری ۹۳-۸۳.

Table 2. Amount of volumetric and time supply during the statistical period 83-93.

تأمین زمانی (درصد) Time supply %	تأمین حجمی (درصد) Volumetric supply %	تأمین Supply	نیاز Demand	سد چغاخور Chaghakhor Dam
0.90	0.90	4.84	5.39	شرب Drinking
0.86	0.87	15.74	18.02	صنعت Industry
0.81	0.83	4.99	6.00	کشاورزی Agriculture
0.83	0.90	4.03	4.46	زیست‌محیطی Environment

طبق مقادیر به‌دست آمده از جدول فوق و مقادیر میزان کمبودها مشاهده می‌شود میزان تأمین آب زیست‌محیطی طبق جدول ۱ روش مونتانا زیست‌محیطی محاسبه شده که در محدوده بهینه و عالی قرار گرفته است، ۱۰ درصد کمبود داریم که در محدوده قابل‌قبول استاندارد می‌باشد و تأمین کشاورزی برابر ۰/۸۳ می‌باشد.

بهینه‌سازی محیط VENSIM: هدف اصلی در این پژوهش بررسی میزان دقت و کارایی بخش بهینه‌سازی محیط ونسیم می‌باشد تا با بهره‌گیری بهینه از سیستم مخزن سد با هدف تأمین آب شرب، کشاورزی، محیط‌زیست و صنعت بهترین میزان رهاسازی صورت پذیرد. شکل ۷ مقایسه بین کل نیازها و رهاسازی‌های واقعی و بهینه‌شده مدل را نشان می‌دهد.

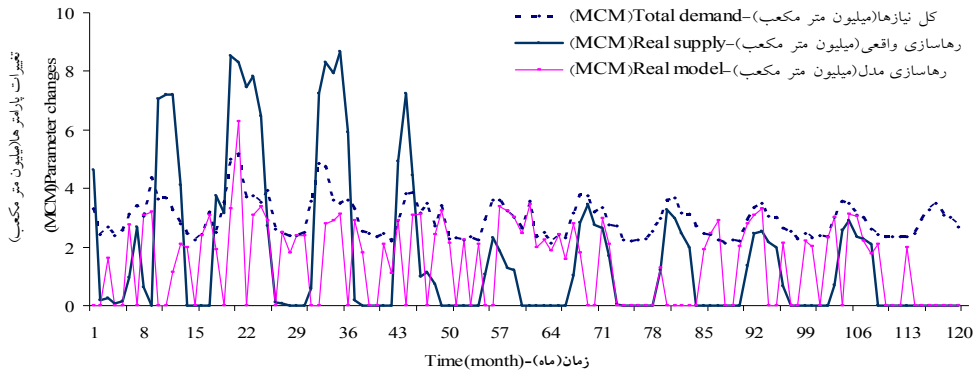


شکل ۷- مقایسه بین کل نیازها و رهاسازی‌های واقعی و بهینه شده مدل VENSIM.

Figure 7. Comparison between total demand and actual supply and Optimized VENSIM model.

شکل فوق نشان می‌دهد که نتایج مدل بسیار نزدیک‌تر به نیاز منطقه بوده است. پس از اجرای مدل مذکور کم‌ترین مقدار تابع هدف رهاسازی برابر ۱۱/۷۸ میلیون مترمکعب محاسبه شد، در حالی‌که مقدار کم‌ترین تابع هدف در رهاسازی واقعی ۲۵/۷۸ میلیون مترمکعب بوده است. می‌توان گفت در شرایط واقعی و در چهار سال ابتدایی میزان رهاسازی از سد مطابق با نیاز صورت نگرفته و در فصول پرآب میزان رهاسازی بیش‌تر از نیاز بوده است که این امر موجب کاهش آب مخزن در فصول کم‌آب سال و پیرو آن افزایش اختلاف بین مقادیر نیاز با رهاسازی‌شده است. در سال‌های پس از آن نیز میزان ورودی به مخزن کاهش یافته و امکان ذخیره آب در ماه‌های پرآب نیز نبوده است. اما با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی، با توجه به ظرفیت مخزن، میزان آب مازاد بر نیاز در ماه‌های پرآب سال ذخیره گشته و در ماه‌های کم‌آب به قدر نیاز رهاسازی صورت گرفته است. بنابراین نتایج مدل نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل جهت تأمین نیازها می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که رهاسازی صورت‌گرفته در شرایط واقعی با مقدار بهینه فاصله داشته و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی می‌توانست تصمیمات مدیریتی بهتری در بهره‌برداری از مخزن صورت بگیرد. هم‌چنین نتایج نشان‌دهنده دقت بالای مدل VENSIM در بهینه نمودن میزان رهاسازی از مخزن سد و کاهش اختلاف بین نیاز پایین‌دست و مقادیر رهاسازی می‌باشد. بنابراین به کمک این روش می‌توان در شرایط بحرانی میزان هدررفت آب را کاهش داد.

بهینه‌سازی مخزن سد با الگوریتم (PSO): در این قسمت مراحل انجام کار به کمک الگوریتم PSO مانند به‌دست آوردن مقادیر رهاسازی، مشخص کردن اندازه جمعیت اولیه و ابعاد آن، بررسی خروجی‌های به‌دست آمده از تابع هدف و قیدها با توجه به تابع جریمه در تکرار معین، پیدا کردن بهترین خروجی، مقایسه خروجی با مقادیر واقعی تا رسیدن به نقطه بهینه مراحل فوق جهت رسیدن به نقطه بهینه یعنی بهینه‌ترین مقدار تأمین آب برای مخزن سد، در محیط نرم‌افزار Matlab 2013 اجرا شد. پس از اجرای مدل مذکور کم‌ترین مقدار تابع هدف رهاسازی برابر ۱۸/۸۲ میلیون مترمکعب محاسبه شد، در حالی‌که مقدار کم‌ترین تابع هدف در رهاسازی واقعی ۲۵/۷۸ میلیون مترمکعب بوده است. نتایج مربوط به رهاسازی به کمک این روش به همراه رهاسازی واقعی و نیاز منطقه در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- مقایسه بین کل نیازها و رهاسازی‌های واقعی و بهینه‌شده مدل PSO.

Figure 8. Comparison between total demand and actual supply and Optimized PSO model.

با توجه به مقادیر واقعی و مقادیر بهینه تأمین حجمی آب سد که از دو مدل به‌دست آمده می‌توان میزان کمبود تأمین حجمی آب هر سال دوره آماری مورد مطالعه به‌دست آورد (جدول ۳).

جدول ۳- مقایسه مقادیر واقعی سالانه تأمین حجمی آب با مقادیر بهینه در مدل پویایی سیستم و PSO و مقدار کمبود تأمین حجمی آب در دو مدل (درصد).

Table 3. Comparison of actual supply water volumetric with optimal amounts in the system dynamics model and PSO and the amount of water supply shortage in two models (percent).

کمبود تأمین حجمی آب در مدل PSO Shortage supply water volumetric with PSO model	کمبود تأمین حجمی آب در مدل VENSIM Shortage supply water volumetric with VENSIM model	کمبود مقادیر واقعی تأمین حجمی آب Shortage actual amounts of supply water volumetric	مقادیر بهینه تأمین حجمی آب با مدل PSO Optimum supply water volumetric with PSO model	مقادیر بهینه تأمین حجمی آب با مدل VENSIM Optimum supply water volumetric with VENSIM model	مقادیر واقعی تأمین حجمی آب Actual amounts of supply water volumetric	شماره سال Number of years
34.05	0.01	18.08	65.94	99.98	81.91	1383-1384
37.31	0.01	0	62.68	99.98	100	1384-1385
41.76	0.01	0	58.23	99.98	100	1385-1386
51.77	7.77	44.27	48.22	92.22	55.72	1386-1387
55.62	48.92	77.19	44.37	51.07	22.80	1387-1388
45.60	42.88	59.07	54.39	57.11	40.92	1388-1389
73.06	55.50	64.37	26.93	44.49	35.62	1389-1390
81.64	71.52	65.34	18.35	28.47	34.65	1390-1391
75.64	52.61	61.14	24.35	47.38	38.85	1391-1392
84.76	55.93	100	15.23	44.06	0	1392-1393

بعد از اجرای دو مدل و بررسی یافته‌ها به مقایسه دو روش پرداخته می‌شود، در جدول فوق میزان تأمین حجمی آب با مدل‌های VENSIM، PSO و هم‌چنین مقادیر واقعی در مخزن سد نشان داده شده است. میزان تأمین‌های حجمی آب با مدل VENSIM در مقایسه با روش PSO به مقادیر واقعی تأمین حجمی آب نزدیک‌تر می‌باشد. در بعضی از سال‌ها (مانند سال اول) میزان تأمین حجمی آب مدل VENSIM بهتر از مقادیر واقعی تأمین حجمی آب است، یعنی نیاز را تقریباً به‌طور کامل تأمین می‌کند و دارای کمبود کم‌تری است در حالی‌که در روش PSO کمبود و تأمین نشدن نیازها مشاهده می‌شود. جدول ٤ حداقل مقدار تابع هدف با مقادیر واقعی و اجرا شده تأمین آب توسط مدل‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ٤- حداقل تابع هدف با مقادیر واقعی و اجرا شده تأمین آب توسط مدل‌ها (میلیون مترمکعب).

Table 4. Minimum target function with actual and implemented water supply by models (MCM).

الگوریتم PSO PSO algorithm	پویایی‌سیستم System dynamics	شرایط واقعی Real conditions	مدل Model
18.82	11.78	25.68	حداقل مقدار تابع هدف با مقادیر تأمین آب اجرا شده توسط مدل Minimum value of the target function with the water supply values implemented by the model

با توجه به جدول ۳ می‌توان گفت مدل پویایی سیستم نسبت به الگوریتم PSO توانایی بالاتری در تعیین حداقل‌سازی تابع هدف داشته است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، فرض شبیه‌سازی و بهینه‌سازی منحنی‌فرمان با روش پویایی‌سیستم از دقت قابل‌قبولی برخوردار است مورد تأیید قرار گرفت. با مقایسه نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش‌های سایر پژوهشگران مانند ناصری (۱۳۸۸) و کدخداحسینی و همکاران (۱۳۹٤) می‌توان به کاراتر بودن این روش در شبیه‌سازی منحنی‌فرمان مخزن سد بیان نمود (۱۱ و ۱۹). هم‌چنین نتایج این پژوهش با نتایج کدخداحسینی و همکاران (۱۳۹٦) و میثاقی و همکاران (۱۳۹۳) که روش پویایی‌سیستم را روش مناسبی برای شبیه‌سازی حجم آب پشت مخزن ارزیابی نموده‌اند، هم‌خوانی دارد.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی سد چغاخور با رویکرد پویایی سیستم‌ها در نرم‌افزار VENSIM ایجاد و نتایج آن با الگوریتم بهینه‌سازی PSO مقایسه شد. به کمک مدل‌های ایجاد شده، طرح استخراج منحنی‌فرمان مخزن این سد مورد بررسی قرار گرفت. پس از ترسیم و مقایسه نتایج شبیه‌سازی و داده‌های مشاهده‌ای، مقدار ضریب همبستگی برای مقادیر حجم مخزن ۰/۹۹۵ و برای مقادیر رهاسازی از مخزن سد برابر ۰/۹۹۱ به‌دست آمد. مقدار تابع هدف و اختلاف مابین داده‌های مشاهده‌ای و نیاز براساس داده‌های مشاهداتی برابر ۲۵/٦۸ میلیون مترمکعب بود. این در حالی است که با بهینه‌سازی تابع هدف به کمک نرم‌افزار VENSIM، مقدار حداقل تابع هدف برابر ۱۱/۷۸ میلیون مترمکعب شد. هم‌چنین، اجرای الگوریتم PSO نیز مقدار بهینه تابع هدف را ۱۸/۸۲ میلیون مترمکعب محاسبه نمود. در مجموع با مقایسه نتایج دو مدل پویایی سیستم و الگوریتم PSO مشخص شد که مدل‌سازی بهینه مخزن سد براساس مدل پویایی سیستم نسبت به الگویتم PSO برتری قابل‌ملاحظه‌ای دارد. در مجموع روش پویایی سیستم می‌تواند روش مفید و کاربردی در مدیریت منابع آب مخازن می‌باشد. با استفاده از این روش سیاست‌گذاران بخش مدیریت منابع آب در وزارت نیرو و مدیران مربوط می‌توانند تخصیص‌های بهینه را برای هر بخش (شرب، کشاورزی، صنعت و محیط‌زیست و ...) منظور نمایند بدون این‌که مخزن مورد تنش قرار بگیرد.

منابع

1.Anonymous. 2013. Estimated Environmental Need for Chaghakhor Wetland. Department of Environmental Protection, Chahar Mahal and Bakhtiari. Park of Science and Technology of Shahrekord. Pp: 1-47. (In Persian)

2.Anonymous. 2013. Technical Report of Hydrographic Operations and Mapping of Choghakhor Dam. P 1-11. Seafar Consulting Engineers, Iran, Sharkhord. (In Persian)

3.Birg, B. 2009. PSOt-a Particle Swarm Optimization Toolbox for use with Matlab. NCSU, MAE Dept, 163: 1. 372-387.

4.Farid-Hossini, AS.R., Garmaei, R., Hasheminia, M., and Hojjati, A. 2015. Calibration and validation of HEC-HMS model parameters with particle swarm optimization algorithm with single-objective approach. P 615-626. in Ferdowsi Water and Earth Magazine, Mashhad. (In Persian)

5.Hasanzadeh, E., Elshorbagy, A., Wheater, H., and Gober, P. 2014. Managing water in complex systems: An integrated water resources model for Saskatchewan. P 12-26. Environmental Modelling & Software, Canada.

6.Hojjati, A., Farid-Hosseini, A.R., Ghahreman, B., and Alizadeh, A. 2012. Comparison of Fractional Methods in Optimization of Multi-objective Systems of Water Resources (Case study: Stur and Pierre Dam in Qezel Ozan Basin). P 9-14, J. Water Environ. Engin. Iran, Mashhad. (In Persian)

7.Jahandide-Tehrani, M., Bozorg Hadad, O., and Marino, M.A. 2014. Power generation simulation of a hydropower reservoir system using system dynamics: Case study of karoon reservoir system. J. Ener. Engin. 140: 1-12.

8.Kadkhoda-Husseini, M., Shah Mohammadi, Sh., Mir-Abbas Najaf Abadi, R., and Nozari, H. 2015. Evaluation of allocation of Choghakhor Dam water resources using dynamic systems approach. The 9th National Conference on the Global Environment Day. Iran, University of Tehran. (In Persian)

9.Kadkhoda-Husseini, M., Shah Mohammadi, Sh., Mir-Abbas Najaf Abadi, R., and Nozari, H. 2015. Determination of Choghakhor dam performance in supplying lower requirements using VENSIM model. The second conference of new findings in environmental and agricultural ecosystems. Iran, University of Tehran. (In Persian)

10.Kadkhoda-Husseini, M., Shah Mohammadi, Sh., Mir-Abbas Najaf Abadi, R., and Nozari, H. 2017. Evaluation of different scenarios for allocating water resources of Choghakhor Dam using a dynamical system. J. Water. Manage. Sci. Engin. 36: 23-32. (In Persian)

11.Kadkhoda-Husseini, M., Shah Mohammadi, Sh., Mir-Abbas Najaf Abadi, R., and Nozari, H. 2013. Using Dynamic Systems Approach for Optimal Water Resources Allocation (Case study: Choghakhor Dam). Iran, Shahrekord, Prees, 169p. (In Persian)

12.Kotir, J.H., Smith, C., Brown, G., Marshall, N., and Johnstone, R. 2016. A system dynamics simulation model for sustainable water resources management and agricultural development in the Volta River Basin, Ghana. Science of the Total Environment, 573: 444-457.

13.Maftahgholaghi, M., and Zahiri, A. 2010. Extracting the dam control curve using GA and PSO algorithms in Golestan Dam. Master's thesis, Islamic Azad University, Tehran. Press, 150p. (In Persian)

14.Mahdiyani, M.R., Godarzi, M., Alipour, M.R., and Motihe, M. 2014. The Effect of Fine Function Adjustment on Improving the Genetic Algorithm for Optimization of Artificial Neutralization with Gas. Scientific Monthly- Promoting the Exploration and Production of Oil and Gas, Iran, Pp: 50-54. (In Persian)

15.Maier, H.R., Simpson, A.R., Zecchin, A.C., Foong, W.K., Phang, K.Y., Seah, H.Y., and Tan, C.L. 2003. Ant colony optimization for design of water distribution systems, J. Water Resour. Plan. Manage. 129: 3. 200-209.

16.Mehdi Pour, A., Bloorurizadeh, E., and Bozorg Hadad, A. 2008. Extracting the dosing tank control curve based on the PSO algorithm. 4th Civil Engineering Congress. University of Tehran, Ncce04-731. (In Persian)
17. Misaghi, A., Judge, K., Heran, B., and Hasheminia, S.M. 2015. Water resource modeling in the catchment area using system dynamics method, Case study: Neyshabour catchment area. Ferdowsi University of Science and Technology, Mashhad, Iran. March 2013, 37: 3. 94-83. (In Persian)
18.Moghaddam, A.R., Alizadeh, A., Farid-Hossini, A.R., Ziaie, A.N., and Fallahhouri, D. 2013. Application of modified algorithm to optimize particle swarm in design of water distribution systems. Irrigation and drainage of Iran, Ferdowsi University of Mashhad, Pp: 389-401. (In Persian)
19.Naseri, H.R., Ahmadi, S., and Salvatabar, A. 2010. Exploitation of water resources modeling coastal dam Urmia Shahrchay using softwere VENSIM. P 1-10, The 1nd Iranian national Conference on applied research in water resource. 16 and 17 November. Iran, Kermanshah. (In Persian)
20.Nassery, H.R., Adinehvand, R., Salavitabar, A., and Barati, R. 2017. Water Management Using System Dynamics Modeling in Semi-arid Regions. J. Civil Engin. 3: 9. 766-778.
21.Niazi, A., Prasher, S.O., Adamowski, J., and Gleeson, T. 2014. A system dynamics model to conserve arid region water resources through aquifer storage and recovery in conjunction with a dam. Water, 6: 8. 2300-2321.
22.Nozari, H., Heidari, M., and Azadi, S. 2013. Simulation of crop yields in different irrigation management systems using dynamic system analysis. J. Water Res. Agric. 27: 4. (In Persian)
23.Ruim, S.P., Naim, H., and Gaspar, M. 2001. Modelling water resources using vensim PLE. Mathematical models and methods in modem science.
24.Solatitabar, A. 2006. System Dynamic Model in Tehran Urban Water Management. PhD of Water Engineering, Science and Research Center, Azad Islamic Universiy, Iran. Tehran. (In Persian)
25.Simonovic, S.P. 2002. World water dynamics: global modeling of water resources. J. Environ. Manage. 66: 3. 249-67.
26.Sterman, J.D. 2000. Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world. McGraw- Hill Higher Education. Boston. 982p.
27.Wei, SH., Yong, H., Song, J., Abbaspour, K., and Xu Z. 2012. System dynamics simulation model for assessing socio-economic impacts of different levels of environmental flow allocation in the Weihe River Basin, China. Europ. J. Oper. Res. 221: 248-262.
28.Wei, T., Lou, I., Yang, Z., and Li, Y. 2016. A system dynamics urban water management model for Macau, China. J. Environ. Sci. 50: 117-126.
29.Winz, I. 2009 .Challenging perspectives: An interdisciplinary exploration of urban stormwater management. PhD Thesis. School of environment. Auckland University: New Zealand, 241p.

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 25(5), 2019
http://jwsc.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/jwsc.2018.12334.2691

Determining the accuracy of the dynamic system in simulating and optimizing the rule curves of the dam reservoir (Case study: Choghakhor dam)

***H. Nozari[1] and M. Vafaee[2]**

[1]Associate Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Bu Ali-Sina University of Hamedan,
[2]Ph.D. Student, Dept. of Water Science and Engineering, Bu Ali-Sina University of Hamedan
Received: 01/04/2018; Accepted: 10/09/2018

Abstract

Background and Objectives: Increasing water demands and limited water resources in arid and semiarid regions has made management and planning necessary for the optimal use of water resources. On the other hand, the surface water resources providing a major portion of water supply for drinking, agriculture and industrial sectors. In this regards, managers need to adopt optimal policies for planning water resources use, especially dams reservoirs. Therefore, many attempts have been made to develop computer models to perform such simulations. One of the most effective methods to evaluate complex systems is system dynamics. This approach is a feedback-based and object-oriented approach. Any dynamic system is characterized by interdependence, mutual interaction, information feedback and circular causality. However, VENSIM is a visual modeling tool that allows models of dynamic systems to be conceptualized, simulated, analyzed and optimized. VENSIM model provides a simple and flexible way of building simulation models from causal loop or stock and flow diagrams. So, in this research, system dynamics and particle swarm optimization algorithm were used to optimize the rule curve of Choghakhor Dam. Finally, the accuracy of the methods was evaluated.

Materials and Methods: The study area is located near Borujen city. Choghakhor dam is a earth fill dam and its water is mainly supplied through precipitation and springs. In this study, the results are compared with monthly data collected over ten years period (2004-2014) in the Choghakhor Dam. The relations between the inflow, the volume of reservoir storage and the rate of release of each period were determined and they were defined by using system dynamics approach in VENSIM model and using pso algorithm in MATLAB model. The objective function and all of the limitations are the same for both of the models.

Results: The results showed that the coefficient of determination (r^2) which is a measure of the degree of correlation between the system dynamics simulation and the observation data was 0.995 for the reservoir volume and 0.991 for the release rate. After optimization, the difference between the requirements and the release rates decreased and reduced the waste of water. The difference was 11.78 MCM for system dynamics approach and 18.82 MCM for PSO algorithm. While in observation, the difference was 25.68 MCM.

Conclusion: In general, the results showed that the system dynamics model is more accurate than the PSO algorithm in optimization of the reservoir operation by rule curve adjust in Choghakhor dam. Also, the results showed that combining simulation and optimization in VENSIM environment can increase the accuracy of optimization to acceptable levels. In this way, in optimizing the curve of the Choghakhor dam, this method is more accurate than the PSO algorithm. Therefore, the system dynamics model can be a useful and practical way in reservoir water resource management.

Keywords: Algorithm PSO, Chghakhor dam, Optimized, Rule curves dam, System dynamics

* Corresponding Author; Email: hanozari@yahoo.com