مدیریت آب و آبیاری
(نشریه علمی)
دوره ۱۰ ■ شماره ۲ ■ پاییز ۱۳۹۹
صفحه‌های ۳۴۶-۳۳۱

مقاله پژوهشی:

بهینه‌سازی چندهدفه سیستم‌های منابع آب سدهای مارون و جره با استفاده از الگوریتم NSGA-II

زهرا گورانی[۱]، سعید شعبانلو[۲*]
۱. کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
۲. دانشیار، گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۲۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۰۶

چکیده
هدف از این پژوهش، توسعه یک مدل کوپل‌شده شبیه‌ساز- بهینه‌ساز برای برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح تخصیص به منابع و مصارف بالادست تالاب شادگان است. به‌طوری‌که علاوه بر حداکثرنمودن درصد تأمین نیازهای حوضه در طول دوره بهره‌برداری، میزان شوری جریان ورودی به تالاب شادگان نیز کاهش یابد. با توجه به اهمیت این تالاب به‌عنوان زیستگاه فصلی پرندگان و هم‌چنین یکی از جاذبه های مهم توریستی منطقه و نیز لزوم حفاظت از اکوسیستم آن، توسعه یک مدل بهینه‌سازی کمی- کیفی برای بهره‌برداری بهینه از منابع آب موجود، هدف این تحقیق می‌باشد. بدین منظور در ابتدا براساس وضع موجود، مدل تهیه‌شده تحت عنوان سناریوی مرجع برای یک دوره ۳۰ ساله آتی (۱۳۹۹ تا سال ۱٤۲۸) توسعه داده شد. سپس برای دست‌یابی به بهترین عملکرد سیستم براساس معیارهای کمی و کیفی، بهینه‌سازی سیستم به‌کمک الگوریتم NSGA–II انجام گردید. نتایج نشان داد مدل بهینه‌ساز، عملکرد خوبی در تأمین نیازهای مختلف و هم‌چنین کاهش شوری جریان ورودی به تالاب شادگان نسبت به سناریوی مرجع دارد. به‌طوری‌که در سناریوی بهینه علاوه بر تأمین مناسب نیازها با اطمینان‌پذیری بیش از ۹۲ درصد در کل سیستم، مقدار شوری رودخانه در محل ورودی به تالاب شادگان به‌ویژه در ماه‌های کم‌آب در حدود ۵۰ درصد کاسته شد. مدل کوپل‌شده پیشنهادی در این تحقیق قابل کاربرد برای سایر مناطق مطالعاتی با رویکرد بهره‌برداری کمی- کیفی می‌باشد و قادر است نقاط بحرانی رودخانه از نظر کمی و کیفی را شناسایی و راه‌حل‌های بهینه برای بهبود وضعیت رودخانه و هم‌چنین اکوسیستم پایین‌دست ارائه دهد.

کلیدواژه‌ها: تالاب شادگان، کوپل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز، نیاز زیست‌محیطی، NSGA-II.

Multi-objective Optimization of Water Resource Systems of Jarreh and Marun Dams Using NSGA-II Algorithm

Zahra Goorani[1], Saeid Shabanlou[2*]
1. Former M. Sc. Student of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.
2. Associate Professor, Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.
Received: May 10, 2020 Accepted: September 27, 2020

Abstract
The aim of this study is to develop a simulator-optimizer coupling model for proper planning and management of resource allocation to the upstream of Shadegan Wetland. In addition to maximizing the supply of basin demands during the operation period, this model tries to decrease the salinity of inflow to Shadegan Wetland. Due to the importance of the wetland as a seasonal habitat for birds and also one of the important tourist attractions and Importance of Protecting the Ecosystem, the development of a quantitative-qualitative optimization model for optimal use of available water resources is the aim of this study. First, based on current conditions, the prepared model is developed as a reference scenario for a future 30-year period (2021 to 2050). To achieve the best system efficiency in terms of quality and quantity, the optimization is performed by means of the NSGA-II algorithm. The results indicate that the optimizer model performs appropriately in supplying various demands and also decreasing the salinity of the inflow to Shadegan Wetland compared to the reference scenario so that in addition to supplying the demands with more than 92% reliability in the whole system, it is expected that the salinity of the river at the entrance to Shadegan Wetland to be reduced by about 50%., especially in low water months. The coupling model proposed in this research is applicable for other study areas with quantitative-qualitative exploitation approach and is able to detect critical points of rivers in terms of quantity and quality. This model has also the capability of providing optimal solutions for improving river conditions as well as downstream ecosystems.

Keywords: Environmental demand, NSGA-II, Shadegan wetland, Simulator-Optimizer coupling model.

* نویسنده مسئول Email: saeid.shabanlou@gmail.com

مقدمه

بهره‌برداری‌های مرسوم از مخزن بر بیشینه‌کردن منافع اجتماعی- اقتصادی تمرکز دارند و توجه کمی را به نیازهای اکوسیستم معطوف می‌دارند (۱۹). در این بین تالاب‌ها همواره در تأمین آب موردنیاز دچار مشکل هستند و ازآنجاکه همیشه در پایین‌دست منابع آبی قرار گرفته‌اند، آن‌طورکه باید به آب موردنیاز برای ادامه حیات خود دست نمی‌یابند. بسیاری از کارشناسان زیست‌محیطی کشور علت خشک‌شدن و کاهش کیفیت آب تالاب‌ها را فعالیت‌های انسانی و پدیده خشکسالی می‌دانند و در همین راستا یکی از عوامل اصلی در تخریب تالاب‌ها احداث سدهایی است که روی رودخانه‌ها ایجاد و مقدار زیادی از آب ورودی تالاب‌ها را کاهش می‌دهد. کاهش آب تالاب‌ها غلظت آلودگی آن‌ها را افزایش داده و بدین ترتیب منجر به ازبین‌رفتن اکوسیستم تالاب می‌شود. تغییرات جریان طبیعی آب نقش حیاتی در حفاظت از سیستم اکولوژیکی رودخانه ایفا می‌نماید و بهره‌برداری از مخازن منجر به تغییرات شدید جریان طبیعی آب و کاهش جریان در پایین‌دست رودخانه می‌شود (۲۱). جهت جلوگیری از نابودی اکوسیستم ضروری است آب رهاسازی‌شده از مخازن به‌منظور تثبیت شرایط اکولوژیکی رودخانه‌ها مدیریت شود (۵). مفهوم جریان زیست‌محیطی برای تعریف حجم آبی که باید در یک رودخانه باقی بماند، ایجاد شده است (۲۰). بسیاری از پژوهش‌گران بر این باورند که حیات اکوسیستم‌هایی که با رودخانه در ارتباطند به‌صورت مشخص به رژیم جریان رودخانه بستگی دارد (۳٤). تخلیه منابع آب موجود برای مصارف کشاورزی، شرب، صنعت و غیره منجر به تغییرات معنی‌داری در رژیم جریان طبیعی و اثرات منفی بر زیستگاه آبزیان شده است (۱۸). در داخل کشور نیز در سال‌های اخیر پژوهش‌گران زیادی در رابطه با برنامه‌ریزی منابع آب حوضه آبریز به‌صورت یکپارچه با هدف تأمین نیاز زیست‌محیطی برای سلامت اکوسیستم و هم‌چنین بهره‌برداری کمی کیفی منابع آب پژوهش نموده‌اند (۱-۹). در یک مطالعه، یک روش بهره‌برداری چندهدفه زیست‌محیطی[1] در قالب یک مدل بهینه‌ساز ارائه گردید و به‌صورت کاربردی در مخزن سد سه‌دره به‌کار گرفته شد (۱۷). به‌منظور ایجاد تعادل بین اهداف اکو-زیست‌محیطی و اجتماعی-اقتصادی، یک استراتژی محاسباتی به‌صورت موردی در مخزن سد Qingshitan در جنوب غربی چین به‌کار گرفته شد (۱۳). با ایجاد یک مدل بهینه‌ساز که در حوضه رودخانه یانگ‌تسه به‌کار گرفته شد، هم نیاز انسان (اجتماعی-اقتصادی) و هم نیاز زیست‌محیطی دریاچه Dongting لحاظ شد. پس از ساختن و بهره‌برداری از سدهای سه‌دره و گژوبا[2] (حوضه روخانه یانگ‌تسه[3])، اثرات آن‌ها بر تحولات هیدرولوژیکی در میانه و پایین‌دست رودخانه یانگ موردتوجه زیاد می‌باشد، تعادل بین نیازهای جریان زیست‌محیطی و انسانی یکی از مهم‌ترین مسائل می‌باشد (۲٤). در مطالعه‌ای دیگر، اثرات ساخت و بهره‌برداری از سدهای سه‌دره و گژوبا را بر تحولات هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی در میانه و پایین‌دست رودخانه یانگ موردتوجه قرار داد (۱۰).

چن و همکاران (۱٤) یک مدل تک‌هدفه که نیازهای آبیاری، کشتیرانی و تأمین شرب را در نظر می‌گیرد، ایجاد کردند که نتیجه حل این مدل، دست‌یابی به منفعت مطلوب اجتماعی-اقتصادی به‌همراه تغییر قابل‌قبول در جریان رودخانه بود. وانگ و لیو (۳۳) از مدل‌های تخمین کمی برای محاسبه نیاز آب اکولوژیکی EWU[4] در مقیاس حوضه و هم‌چنین برآورد میزان آب موردنیاز برای احیای سطح آب زیرزمینی استفاده کردند.

سوئن و اهرت (۳۰) برای ایجاد تعادل بین اکوسیستم و نیازهای انسانی و مدیریت مخزن Shihmen از الگوریتم

NSGA-II بهره بردند. در پژوهشی که برای ارزیابی تغییرات هیدرولوژیکی ایجادشده توسط انحرافات جریان به‌صورت موردی در تایوان برای سرریز انحرافی Kaoping انجام شد، از روش برنامه‌ریزی سازگار برای تعیین جریان درون رودخانه‌ای استفاده شد (۲۸). در اواخر دهه ۱۹۹۰ تعدادی از اکولوژیست‌ها ایده "رژیم طبیعی جریان" را ارائه دادند که فرض می‌شود برای کل اکوسیستم آبزی سودمند باشد (۲۱).

کاردول و همکاران (۱۱) از چندین سناریوی حداقل جریان ماهیانه برای مطالعه بین ظرفیت جمعیت ماهیان و مقادیر کمبود آب انسانی استفاده کردند. شیائو و وو (۲۷) از روش RVA (Range of Variation) برای بررسی تأثیرات هیدرولوژیکی سرریز انحرافی در تایوان استفاده کردند. آن‌ها بر تبادل بین تغییرات شاخص هیدرولوژیکی و نیازهای آب انسانی به‌منظور بهبود زندگی طبیعی گیاهان و جانوران رودخانه تمرکز کردند. هما و همکاران (۱۶) یک مدل بهینه‌سازی برای جستجوی یک راه‌حل تبادلی بین منافع اجتماعی–اقتصادی و ابقای جریان طبیعی ایجاد نمودند. چن و همکاران (۱٤)، چن و همکاران (۱۵) و لی و همکاران (۲۲) یک هیدروگراف اکولوژیکی را که نمایانگر نیاز جریان روزانه برای حفاظت از زیستگاه ماهی موردنظر است به‌کار گرفتند و از آن به‌عنوان یک قید در مدل بهره‌برداری استفاده کردند.

تیسدل (۳۲) گزینه‌های مدیریتی برای تجدید رژیم جریان زیست‌محیطی در حوضه Murrumbidgee را موردمقایسه قرار داد. لوو و همکاران (۲۳) و نیکولیک و سیمونوویچ (۲۵) از تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA)[۵] برای تشخیص نتایج بحرانی، تخصیص اولویت‌های مرتبط و تأمین نیاز زیست‌محیطی استفاده کردند. هوو و همکاران (۱۷) برای حل مدل زیست‌محیطی بهره‌برداری از مخزن سه دره (TGR)[۶] در چین از الگوریتم ژنتیک براساس ترکیب مدل‌های آماری کیفی در توابع هدف آن، استفاده کردند. آذری و همکاران (۱) از الگوریتم چندهدفه NSGA-II برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از سدهای شهدا و گاوشان براساس قاعده جیره‌بندی با هدف تأمین نیازهای انسانی و هم‌چنین تخصیص مناسب جریان زیست‌محیطی در رودخانه رازآور استفاده کردند. اعمال قواعد جیره‌بندی مخزن یکی از راه‌کارهای کاهش خطلت ناشی از کمبود آب در ماه‌های خشک و تأمین نیاز زیست‌محیطی رودخانه در این ماه‌هاست (۳۵).

بررسی پژوهش‌های ذکرشده نشان می‌دهد هدف قراردادن بهره‌برداری از منابع آب حوضه به‌منظور تأمین نیازهای انسانی (شرب، کشاورزی و صنعت) به‌ویژنه کشاورزی به‌عنوان مصرف‌کننده اصلی توجه کمی را به نیاز زیست‌محیطی و وضعیت کیفی رودخانه معطوف می‌دارد. در کشورهای در حال توسعه از بین متقاضیان آب، کشاورزی بیش‌ترین سهم را در بین مصارف داراست. با رشد جمعیت علاوه بر مصارف آبیاری، مصارف شهری و صنعتی نیز سبب رقابت بین مصرف‌کنندگان آب شده و با توجه به منافع اقتصادی ناشی از بهره‌وری آب در بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت، وضعیت کیفی رودخانه کم‌اهمیت یا نادیده انگاشته می‌شوند. از جمله دریاچه‌های طبیعی عظیمی که به‌ویژه در سال‌های اخیر در اثر این سیاست‌های نادرست در معرض آسیب جدی قرار گرفته است، تالاب شادگان می‌باشد. لذا هدف از این پژوهش بررسی وضع موجود منابع و مصارف در بالادست تالاب شادگان و توسعه یک مدل کوپل‌شده شبیه‌سازی- بهینه‌سازی چندهدفه به‌منظور بهبود وضعیت کمی- کیفی جریان ورودی به این تالاب در و هم‌چنین تأمین حداکثری نیازهای بالادست است. در این مدل چندهدفه، اهدافی مانند حداکثرسازی درصد

تأمین نیاز تمام مصارف حوضه و حداقل‌نمودن میزان تخطی از شوری مجاز رودخانه در محل ورودی به تالاب در طول دوره بهره‌برداری در مقابل هم قرار می‌گیرند. ارائه یک معیار ماهیانه تخصیص جریان زیست‌محیطی براساس وضع موجود منابع و مصارف منطقه، به‌جای روش هیدرولوژیکی تنانت برای بهبود وضعیت کیفی رودخانه از اهداف دیگر این پژوهش است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

تالاب شادگان یکی از تالاب‌های بزرگ ایران است. این تالاب در جنوب‌غربی ایران در جنوب شهر شادگان در استان خوزستان واقع شده است. قسمت اصلی جریان آب شیرین ورودی به این تالاب توسط رودخانه جراحی تأمین می‌شود. رودخانه جراحی از به‌هم پیوستن دو رودخانه مارون و الله تشکیل شده است. به‌دلیل توسعه اراضی کشاورزی در مجاورت این سه رودخانه و احداث سدهای مارون و جره بر روی رودخانه‌های مارون و الله، جریان زیست‌محیطی این تالاب در سال‌های اخیر رعایت نمی‌شود. هم‌چنین تخلیه زهکش‌های کشاورزی و پساب‌های شهری در رودخانه‌ها باعث شده است که این تالاب منحصربه‌فرد در وضعیت بحرانی قرار گیرد. موقعیت رودخانه‌ها، سدها و مصارف موجود در بالادست این تالاب در شکل (۱) نشان داده شده است.

مدل شبیه‌سازی آب سطحی

در این پژوهش از مدل ویپ به‌عنوان ابزار تحلیلی با قابلیت ارزیابی و مدل‌سازی منابع و مصارف مختلف برای اعمال سناریوهای مدیریتی و هم‌چنین شبیه‌سازی روند کیفی در رودخانه مارون و جراحی استفاده شد (۲۹). پیکربندی منابع و مصارف در کل محدوده منطقه مطالعاتی در شکل (۲) نشان داده شده است.

پس از ورود اطلاعات منابع و مصارف به مدل به‌منظور واسنجی و صحت‌سنجی برای شبیه‌سازی آینده، مدل در بازه پنج ساله (سه سال کالیبراسیون و دو سال واسنجی) از مهرماه سال ۱۳۹۱ تا شهریورماه ۱۳۹۶ اجرا و مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت. به‌منظور واسنجی و صحت‌سنجی کمی و کیفی مدل از آمار و اطلاعات مربوط به حجم ذخیره مشاهداتی مخزن سدهای مارون و جره و هم‌چنین اطلاعات کمی و کیفی ایستگاه‌های هیدرومتری چم نظام و جوکنک واقع بر رودخانه‌های مارون و الله استفاده گردید.

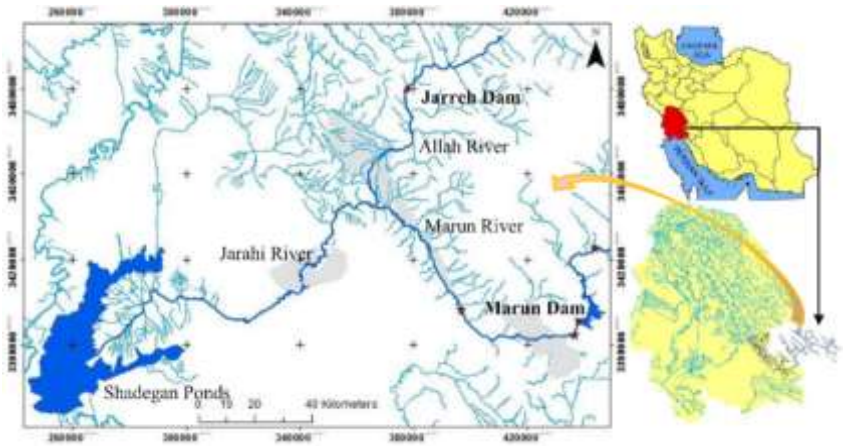

Figure 1. Situation of study area, dams, rivers and demands at upstream of Shadegan Wetland

سپس دوره شبیه‌سازی ۳۰ ساله از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ در نظر گرفته شد. فرایند شبیه‌سازی با تعریف مسأله، معرفی محدوده مطالعاتی، رودخانه‌ها و سدها، تعیین محل‌های مصرف و منابع آب سطحی و زیرزمینی صورت گرفت. هم‌چنین اطلاعات مربوط به مقاطع رودخانه‌ای، نقاط برداشت آب، مقدار شوری زهکش‌های کشاورزی و پساب‌های شهری و سایر آلاینده‌ها با در نظرگرفتن نقاط تخلیه آن‌ها در رودخانه‌ها در مدل وارد شد. هم‌چنین مقدار نیاز ماهیانه تجمیع‌شده هر یک از این مصارف شهری و کشاورزی در محدوده مطالعاتی در شکل (۳) ارائه شده است.

اطلاعات دیگری مانند ایستگاه‌های هیدرومتری، داده‌های موردنیاز شامل منحنی سطح- حجم- ارتفاع مخازن، تبخیر از مخزن، بارش، حجم مرده و مفید مخازن، تراز نرمال، تراز حداکثر بهره‌برداری و داده‌های شوری نقاط برگشت آب شرب و کشاورزی در مدل تعریف شدند.

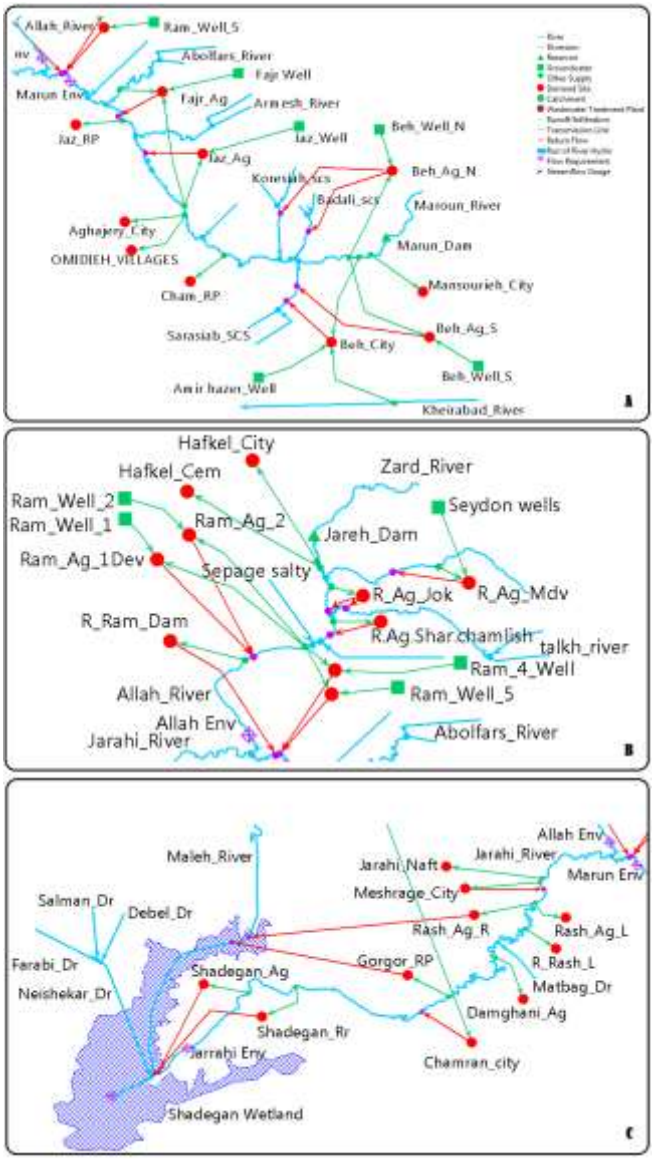

Figure 2. Configuration of resources and uses in (A) Maroun River, (B) Allah River, (C) Jarahi River

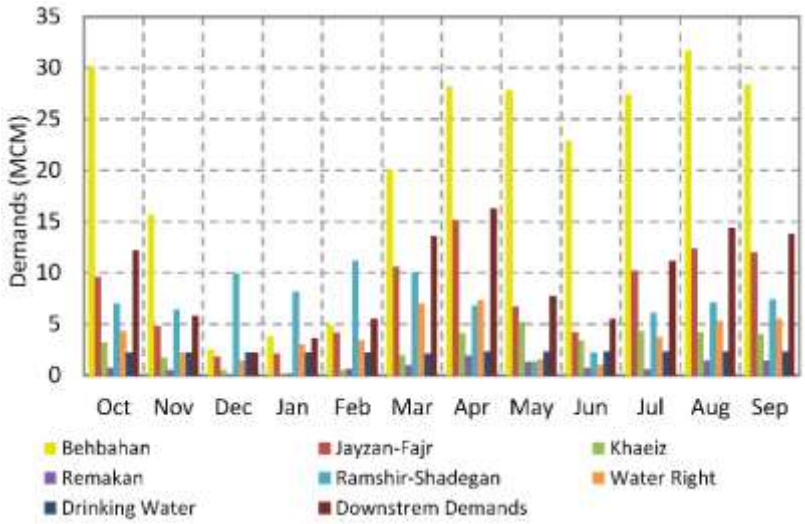

Figure 3. Average water demands of different uses at upstream of Shadegan Wetland in MCM

تدوین سناریوها

در این پژوهش برای ارزیابی وضعیت کمی-کیفی آب رودخانه‌ها به‌ویژه در محل تخلیه به تالاب شادگان، دو سناریو در نظر گرفته شد. سناریوی اول با فرض ادامه وضع موجود بهره‌برداری در طول دوره ۳۰ ساله آتی (سناریوی مرجع) در نظر گرفته شد. سناریوی دوم تحت عنوان سناریوی بهینه برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم سد و رودخانه تعریف گردید. در این سناریو با اتصال مدل شبیه‌ساز به بدنه الگوریتم بهینه‌ساز NSGA-II سعی شد برای بهبود وضعیت کمی-کیفی رودخانه‌ها در بالادست تالاب شادگان، در ماه‌های مختلف جریان زیست‌محیطی بهینه که باید برای این تالاب رهاسازی شود محاسبه گردد. این در حالی است که اکثر پژوهش‌گران روش هیدرولوژیکی تنانت را برای تخمین میزان جریان زیست‌محیطی مورداستفاده قرار می‌دهند، که تنها دو جریان زیست‌محیطی را برای شش‌ماهه اول و دوم سال پیشنهاد می‌دهد (۳۱). لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر از رویکرد بهینه‌سازی معین که در پژوهش‌های زیادی از آن استفاده شده است بهره گرفته شد (٦، ۷، ۱۲ و ۳۵). در نهایت نتایج حاصل از سناریوی دوم با سناریوی مرجع موردمقایسه و ارزیابی قرار گرفت.

بهینه‌سازی سیستم

در این پژوهش از الگوریتم تکاملی چندهدفه NSGA-II به‌دلیل دارابودن توانایی در حل مسائل پیچیده و ارائه منحنی تبادل بهینه بین اهداف استفاده شد. این الگوریتم به‌راحتی می‌تواند مسائلی که از پیوستگی خاصی تبعیت نمی‌کنند، فضای تصمیم موجه یکپارچه‌ای ندارند و یا توابع هدف آن‌ها که دارای پارامترهای تصادفی هستند را حل کند. مطابق با روش NSGA-II، در هر تکرار بهترین جواب‌ها براساس ارزش‌گذاری توابع هدف انتخاب می‌شوند و تحت عنوان مجموعه ذخیره بهینه جهت انتقال به مرحله بعد ذخیره می‌شوند. در هر تکرار متغیرهای تصمیم تولیدشده توسط الگوریتم به محیط شبیه‌ساز WEAP فرستاده شده و نتایج حاصل از آن توسط توابع هدف موردارزیابی قرار می‌گیرد. این فرایند توسط یک VB Script که در محیط MATLAB توسعه داده شده و به بدنه الگوریتم چندهدفه و مدل WEAP متصل است

انجام می‌گیرد. درحالی‌که رفیعی انزاب و همکاران (۲۶) از تابع تک‌هدفه PSO در اتصال به WEAP برای بهینه‌سازی سیستم در محیط EXCEL استفاده کرده‌اند.

در پژوهش حاضر، نقاط ترسیم‌شده در گراف پارتو همان جواب‌های بهینه مدل در آخرین تکرار الگوریتم است و محورهای این گراف توابع هدف موردنظر می‌باشند. در فرایند بهینه‌سازی دو تابع هدف شامل حداکثرسازی درصد تأمین نیازهای طرح و حداقل‌سازی میزان تخطی از مقدار مجاز شوری در رودخانه در طول دوره بهره‌برداری در مقابل هم قرار گرفتند. جهت بهره‌برداری بهینه از کل سیستم با توجه به اهداف پیش رو، میزان رهاسازی آب از کل سیستم جهت مصارف زیست‌محیطی تالاب شادگان در هر ماه (۱۲ متغیر) به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شد. توابع هدف و قیود در مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز به‌صورت روابط (۱) تا (٦) تعریف شدند.

توابع هدف

۱- بیشینه‌سازی درصد تأمین نیاز تمام مصارف در ماه‌های مختلف

$$F_1 = Maximize(\sum_{z=1}^{m}\sum_{d=1}^{k}\sum_{t=1}^{n}(COV_{zdt})) = Maximize(\sum_{z=1}^{m}\sum_{d=1}^{k}\sum_{t=1}^{n}(\frac{TDW_{zdt}}{MD_{zdt}})) \quad (۱)$$

به‌دلیل این‌که الگوریتم بهینه‌سازی مورداستفاده به دنبال کمینه‌کردن توابع هدف است می‌توان تابع فوق را به‌صورت زیر تعریف نمود:

$$F_1 = Minimize(\sum_{z=1}^{m}\sum_{d=1}^{k}\sum_{t=1}^{n}(1 - COV_{zdt})) = Minimize(\sum_{z=1}^{m}\sum_{d=1}^{k}\sum_{t=1}^{n}(1 - \frac{TDW_{zdt}}{MD_{zdt}}) \quad (۲)$$

که در این رابطه: COV_{zdt}: درصد تأمین نیاز d در دوره t در منطقه z به‌صورت اعشاری، TDW_{zdt}: حجم کل آب تحویلی به نیاز d در دوره t در منطقه z، MD_{zdt}: حجم کل آب موردنیاز، نیاز d در دوره t در منطقه z می‌باشند.

۲- کمینه‌نمودن میزان تخطی از مقدار مجاز شوری در رودخانه در طول دوره بهره‌برداری

$$F_2=\text{Minimize}(\sum_{t=1}^{n}\sum_{p=1}^{q}\sum_{r=1}^{nr}(\frac{EC_{tpr}-\text{Accepted } EC_p}{\text{Accepted } EC_p})) \quad (۳)$$

که در آن: $\text{Concentration}_{tpr}$ مقدار پارامتر EC در هر نقطه p در هر دوره t در رودخانه r، $\text{Accepted Concentration}_p$ مقدار EC مجاز مطابق با استانداردهای موجود، n تعداد دوره‌های زمانی برنامه‌ریزی، q تعداد نقاط بهره‌برداری در طول رودخانه و nr تعداد رودخانه‌ها می‌باشند.

محدودیت‌ها

$$TDW_{zdt} = SW_{zdt} + GW_{zdt} \quad (٤)$$

SW_{zdt} حجم کل آب سطحی تخصیص داده‌شده به نیاز d در دوره t در منطقه z، GW_{zdt} حجم کل آب زیرزمینی تخصیص داده‌شده به نیاز d در دوره t در منطقه z

$$TSW_t = SW_B + SW_{JF} + SW_{DI} + SW_{WRU} + SW_R + SW_{ADD} + SW_{WRD} + SW_{MIN} \quad (۵)$$

SW_{DI} کل آب سطحی برداشت‌شده برای نیاز شرب و صنعت، SW_B کل آب سطحی برداشت‌شده برای اراضی بهبهان، SW_{JF} کل آب سطحی برداشت‌شده برای اراضی جایزان- فجر، TSW_t کل آب سطحی موردنیاز، SW_{WRU} کل آب سطحی برداشت‌شده برای حقابه سنتی بالادست، SW_R کل آب سطحی برداشت‌شده برای اراضی رامهرمز، SW_{WRD} کل آب سطحی برداشت‌شده برای حقابه سنتی پایین‌دست، SW_{MIN} کل آب سطحی برداشت‌شده برای نیاز زیست‌محیطی، SW_{ADD} کل آب سطحی برداشت‌شده برای اراضی کشاورزی پایین‌دست (ری مکان- خاییز- رامشیر و شادگان) است.

$$Q_{ct} \le Q_{cmax} \quad (٦)$$

Q_{ct} دبی کانال اصلی شبکه c در دوره t، Q_{cmax} ظرفیت کل انتقال کانال اصلی شبکه c در دوره t است.

نتایج و بحث

اجراهای مکرر مدل نشان داد برای رسیدن به نتایج بهتر، جمعیت اولیه کروموزوم‌ها باید حداقل دو برابر تعداد متغیرهای تصمیم باشد، که در این پژوهش تعداد جمعیت اولیه در مدل در حدود ٢٤ انتخاب شد. تعداد تکرار الگوریتم جهت رسیدن به همگرایی در حدود ٥٠٠ در نظر گرفته شد. بنابراین برای رسیدن به جواب بهینه مدل ١٢٠٠٠ بار اجرا شد که زمان اجرای آن در یک لب تاب Lenovo-Corei7 با RAM 16 در حدود ٨ و نیم ساعت بود. در آخرین تکرار الگوریتم منحنی تبادل بهینه (گراف پارتو) بین اهداف بهینه‌سازی (تابع حداکثرسازی درصد تأمین نیاز مصارف در طی دوره برنامه‌ریزی و حداقل‌سازی تخطی از مقادیر مجاز شوری در طول دوره بهره‌برداری در طول رودخانه‌ها) به‌دست آمد. این منحنی براساس مجموعه ٢٤ جواب بهینه در آخرین تکرار در نمودار شکل (٤) نشان داده شده است. اجراهای مختلف مدل در آخرین تکرار الگوریتم نشان داد که پس از اجرای تک‌تک ٢٤ جواب به‌دست‌آمده در گراف پارتو و شبیه‌سازی سیستم براساس این پاسخ ها، با توجه به ارزش‌گذاری توابع هدف، جواب شماره ٧ دارای بهترین عملکرد نسبت به سایر جواب‌ها بود و به‌عنوان جواب برتر انتخاب شد.

متغیرهای بهینه (مقادیر جریان زیست‌محیطی بهینه در پایین‌دست رودخانه جراحی) حاصل از پاسخ شماره ٧ در مدل آب سطحی WEAP وارد شده و نتایج حاصل از آن بررسی گردید. در ادامه نتایج حاصل از اجرای این پاسخ بر کل سیستم تحت عنوان سناریوی بهینه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و نتایج حاصل از آن با سناریوی رفرنس موردمقایسه قرار می‌گیرد. شکل (٥) مقادیر بهینه جریان زیست‌محیطی ماهیانه رودخانه جراحی قبل از ورودی به تالاب شادگان را نشان می‌دهد.

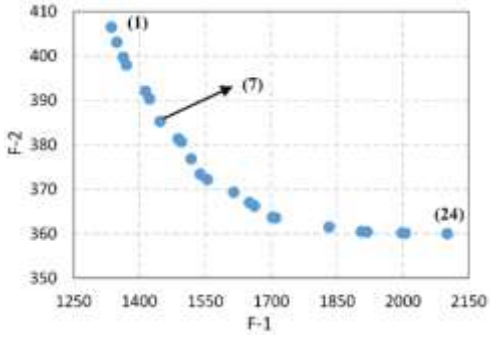

Figure 4. Curve of optimal exchange between optimization goals (Pareto curve) in iteration 500

Figure 5. Optimal values of monthly environmental flows of the Jarahi River before entering Shadegan Wetland (m^3/s)

شکل (٦) مقدار اطمینان‌پذیری و شکل (٧) درصد تأمین نیاز هر کدام از مصارف در سناریوهای رفرنس و بهینه را نشان می‌دهد. مطابق با شکل (٦) کم‌ترین مقدار اطمینان‌پذیری مربوط به مصارف Agri#1 و Agri#2 می‌باشد که در سناریوهای رفرنس و بهینه به‌ترتیب در حدود ٩٣/٦ و ٩١/٩ درصد می‌باشد. علت این‌که میزان اطمینان‌پذیری نیازها در سناریوی بهینه تا حدودی کم‌تر شده است، این است که با توجه به چندهدفه‌بودن تابع هدف در الگوریتم بهینه‌ساز، مقداری از جریان رودخانه برای کاستن از غلظت شوری در طول رودخانه به جریان زیست‌محیطی اختصاص یافته است. با توجه به اولویت اول جریان زیست‌محیطی نسبت به سایر نیازها، هیچ کدام از مصارف دیگر اجازه برداشت این مقدار دبی را ندارند. از طرفی با توجه به این‌که تابع هدف دوم الگوریتم، حداکثرسازی درصد تأمین نیاز مصارف است، مقدار معقولی از جریان رودخانه به جریان زیست‌محیطی اختصاص یافته است، طوری‌که میزان اطمینان‌پذیری تأمین نیازها هم در حد معقول و قابل‌قبولی باشد.

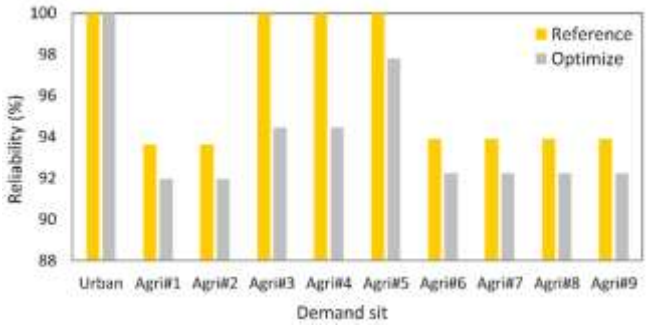

Figure 6. Reliability level of supplying demands of various uses in reference and optimal scenarios

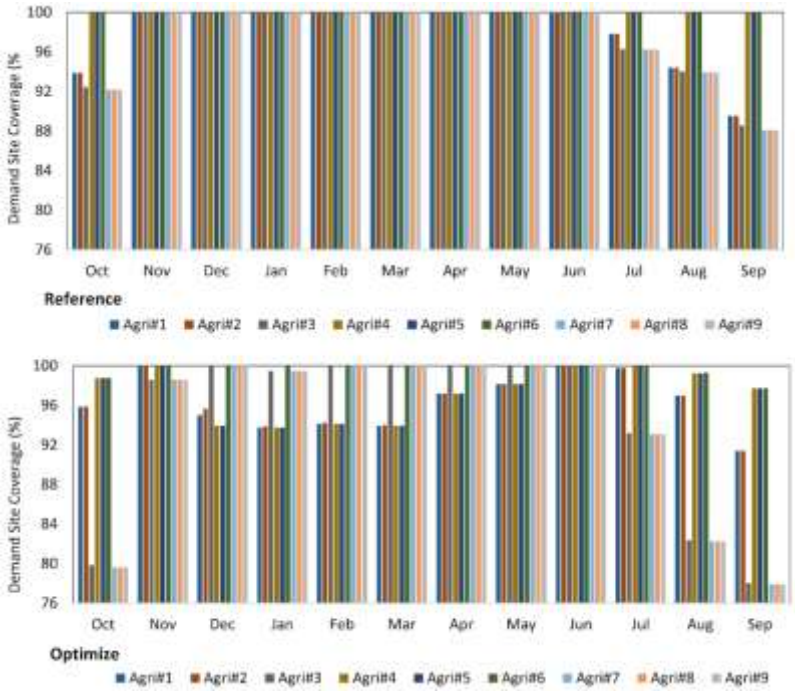

Figure 7. Percentage of water demand supply of each of uses in reference and optimal scenarios

شکل (۷) نشان می‌دهد در سناریوی بهینه مقدار درصد تأمین نیاز مصارف مختلف در تمامی ماه‌های سال نسبت به سناریوی رفرنس تا حدودی کاهش یافته است. کم‌ترین مقدار درصد تأمین نیاز در سناریوی بهینه مربوط به ماه‌های سپتامبر و اکتبر به میزان ۷۸ و ۸۰ درصد بوده که نسبت به سناریوی رفرنس به‌ترتیب به میزان ۱۰ و ۱۲ درصد کاهش یافته است. اما این کاهش در حد معقول بوده و در سناریوی بهینه درصد تأمین نیاز در اکثر ماه‌ها بالای ۸۰ درصد است. علت این کاهش نیز اختصاص مقداری از جریان رودخانه در این ماه‌ها جهت تأمین نیاز زیست‌محیطی پایین‌دست و کاهش شوری جریان ورودی به تالاب شادگان می‌باشد. زیرا مقدار شوری آب رودخانه در سناریوی رفرنس در حد بحرانی بوده و در برخی از ماه‌ها بسیار فراتر از حد استاندارد می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد مدل کوپل‌شده شبیه‌ساز–بهینه‌ساز تنها به‌دنبال افزایش درصد تأمین نیاز نبوده و علاوه بر درنظرداشتن فاکتورهای کمی در برنامه‌ریزی منابع آب، فاکتورهای کیفی جریان آب را نیز در نظر گرفته و براساس هر دو هدف سعی در پیداکردن بهترین جواب برای بالابردن کارایی سیستم دارد.

شکل (۸) عملکرد مخزن در دو سناریوی رفرنس و بهینه را در طول دوره بهره‌برداری (۳۶۰ ماه) نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که در سناریوی بهینه براساس اهداف تعریف‌شده و با درنظرگرفتن معیارهای کمی و کیفی، در برخی از ماه‌ها مقدار بیش‌تری از جریان رهاسازی‌شده و در برخی از ماه‌ها که نیاز کم‌تری به رهاسازی جریان برای مصارف پایین‌دست بوده، مقداری آب را در مخزن سد ذخیره نموده است تا در ماه‌های کم‌آب تر این جریان را رهاسازی نماید. این کار باعث بهبود وضعیت کیفی و افزایش جریان زیست‌محیطی رودخانه در ماه‌های کم‌آب خواهد شد.

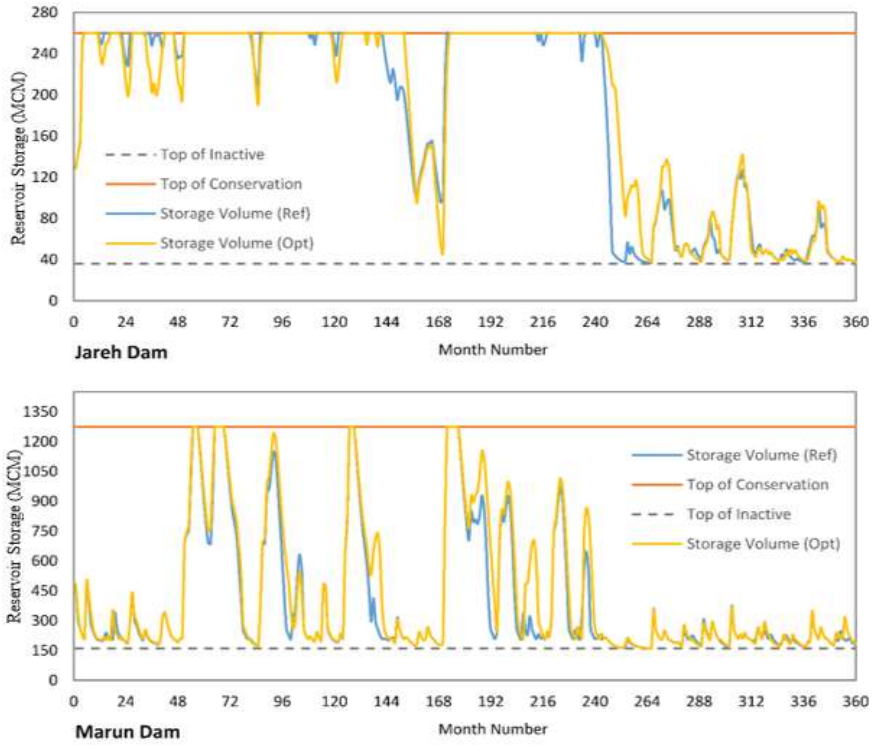

Figure 8. Variations of storage volume in Jarreh and Marun dams during operation period (MCM) in both reference (Ref) and optimal (Opt) scenarios

شکل‌های (۹) و (۱۰) وضعیت شوری جریان آب در رودخانه به‌ویژه در بازه‌های انتهایی و قبل از ورود به تالاب شادگان را در سناریوهای رفرنس و بهینه نشان می‌دهد. برای مقایسه عملکرد الگوریتم بهینه‌ساز و بررسی وضعیت شوری رودخانه قبل از ورود به شادگان، چهار نقطه روی رودخانه جراحی در نظر گرفته شد، که جانمایی آنها در این شکل‌ها نشان داده شده است. این چهار نقطه بیش‌ترین میزان شوری را در سناریوی رفرنس در طول دوره بهره‌برداری ۳۰ ساله (۳٦۰ ماه) داشته‌اند و مکان‌های خوبی برای بررسی عملکرد الگوریتم در کاهش شوری رودخانه به‌حساب می‌آیند.

شکل (۹) نشان می‌دهد که در سناریوی رفرنس در این چهار نقطه میزان شوری جریان در طول دوره بهره‌برداری در اکثر ماه‌ها بسیار فراتر از حد استاندارد می‌باشد. در بین آنها، نقطه ٤ یعنی محل ریزش جریان رودخانه به تالاب شادگان دارای بدترین وضعیت بوده، طوری‌که در برخی از ماه‌ها شوری جریان به میزان ۱۵۰۰۰ umhos/cm می‌رسد که حدود ۱۵ برابر فراتر از مقدار استاندارد در نظر گرفته‌شده در این مدل (یعنی ۱۰۰۰ umhos/cm) می‌باشد. پس از این نقطه، نقاط ۲ و ۳ دارای بیش‌ترین مقدار شوری بوده و وضعیت بدتری نسبت به نقطه ۱ یعنی ابتدای رودخانه جراحی دارند. این نتایج نشان می‌دهد که سناریوی رفرنس برخلاف تأمین نیاز مصارف مختلف در حد قابل‌قبول، توجهی به تأمین نیاز زیست‌محیطی رودخانه به‌ویژه در بازه‌های انتهایی آن ندارد. در این سناریو مقدار شوری جریان رودخانه در محل ورود به تالاب شادگان در بدترین وضعیت ممکن قرار دارد و این امر اهمیت توسعه یک مدل بهینه برنامه‌ریزی کمی-کیفی برای مدیریت مقدار برداشت از رودخانه و کنترل شوری آن را نشان می‌دهد.

در سناریوی بهینه پس از اتصال مدل شبیه‌ساز به الگوریتم NSGA-II و اجرای مدل کوپل‌شده، مقادیر بهینه جریان زیست‌محیطی رودخانه برای کاهش غلظت شوری جریان آب ورودی به تالاب شادگان به‌دست آمد. شکل (۱۰) تغییرات غلظت EC رودخانه در نقاط منتخب ۱ تا ٤ را در طول دوره بهره‌برداری در سناریوی بهینه نشان می‌دهد. براساس این شکل مقدار شوری جریان آب رودخانه در نقاط ۲ و ٤ دارای بیش‌ترین مقدار بوده و در برخی از ماه‌ها به ۷۵۰۰ umhos/cm می‌رسد. این مقدار هم‌چنان بیش‌تر از مقدار استاندارد شوری رودخانه (یعنی ۱۰۰۰umhos/cm) است، اما نسبت به سناریوی رفرنس در حدود ۵۰ درصد کاهش داشته است که نشان‌دهنده عملکرد موفق مدل پیشنهادی می‌باشد. هم‌چنین در اثر اجرای سناریوی بهینه بیش‌ترین مقدار شوری ثبت‌شده در نقطه ۳ در طول دوره بهره‌برداری به ۷٤۰۰ umhos/cm می‌رسد که نسبت به حداکثر مقدار شوری در سناریوی رفرنس در این نقطه (۱۰۰۲۷ umhos/cm) در حدود ۲٦ درصد کاسته شده است. میزان کاهش Max EC در نقطه ۱ نیز نسبت به سناریوی رفرنس در حد ۱۰ درصد بوده است. این نتایج نشان می دهد که مدل توسعه داده‌شده کارایی خوبی در ارائه راه‌حل‌های قابل‌قبول برای بهره‌برداری بهینه کمی کیفی از رودخانه دارد. استفاده از راه‌حل پیشنهادی این علاوه بر تأمین نیاز مصارف مختلف در حد قابل‌قبول و با اطمینان‌پذیری بالا، منجر به کاهش ۵۰ درصدی شوری جریان ورودی به تالاب بختگان به‌ویژه در ماه‌های کم‌آب شد.

نتیجه‌گیری

تالاب شادگان به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین تالاب‌های ایران در اثر برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب بالادست و هم‌چنین تخلیه زهکش‌های کشاورزی و پساب‌های شهری در رودخانه جراحی واقع در بالادست آن، با کاهش شدید کیفیت آب ورودی به آن مواجه شده است.

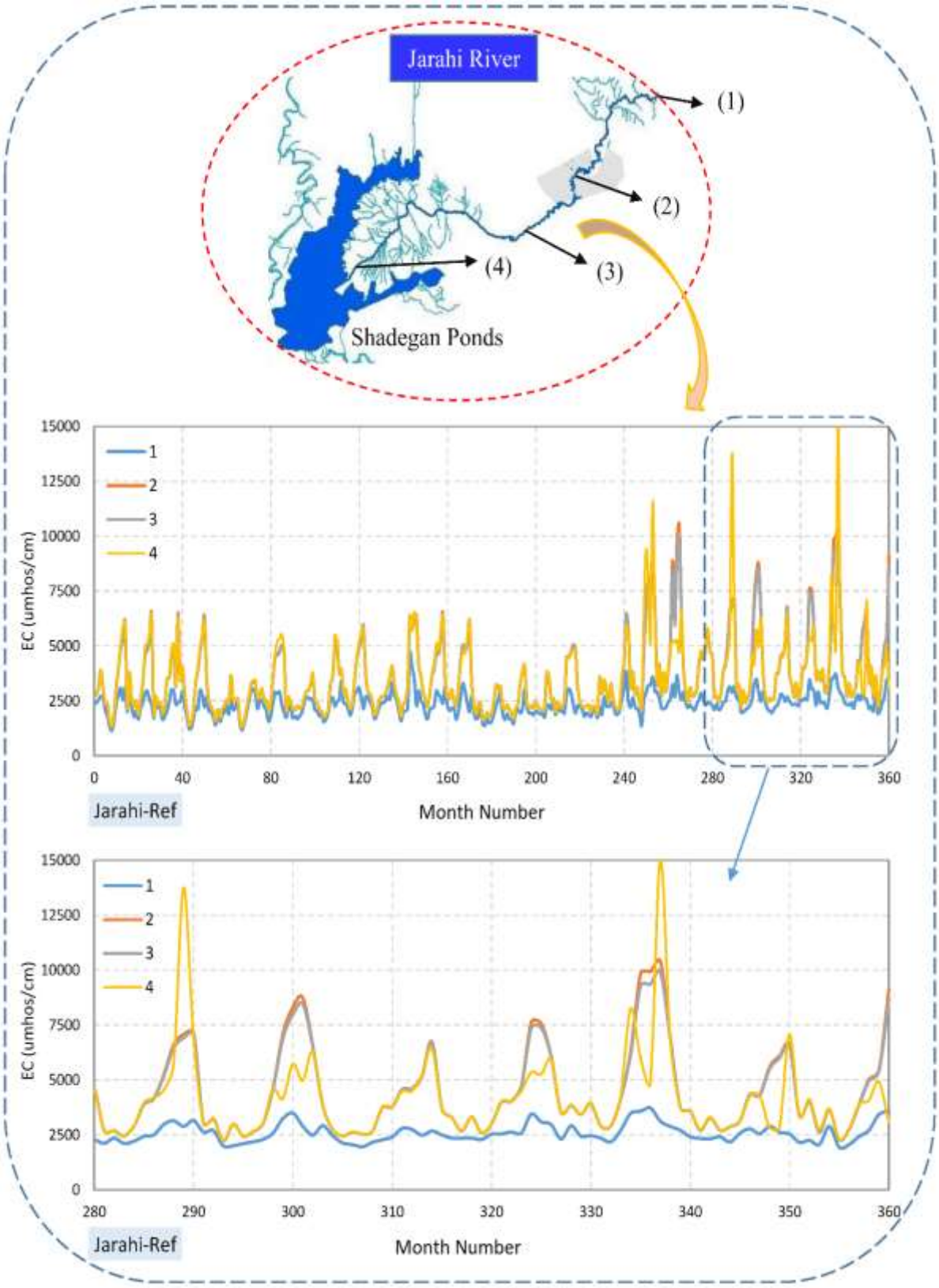

Figure 9. Salinity changes at different points of the Jarahi River during operation period- reference scenario

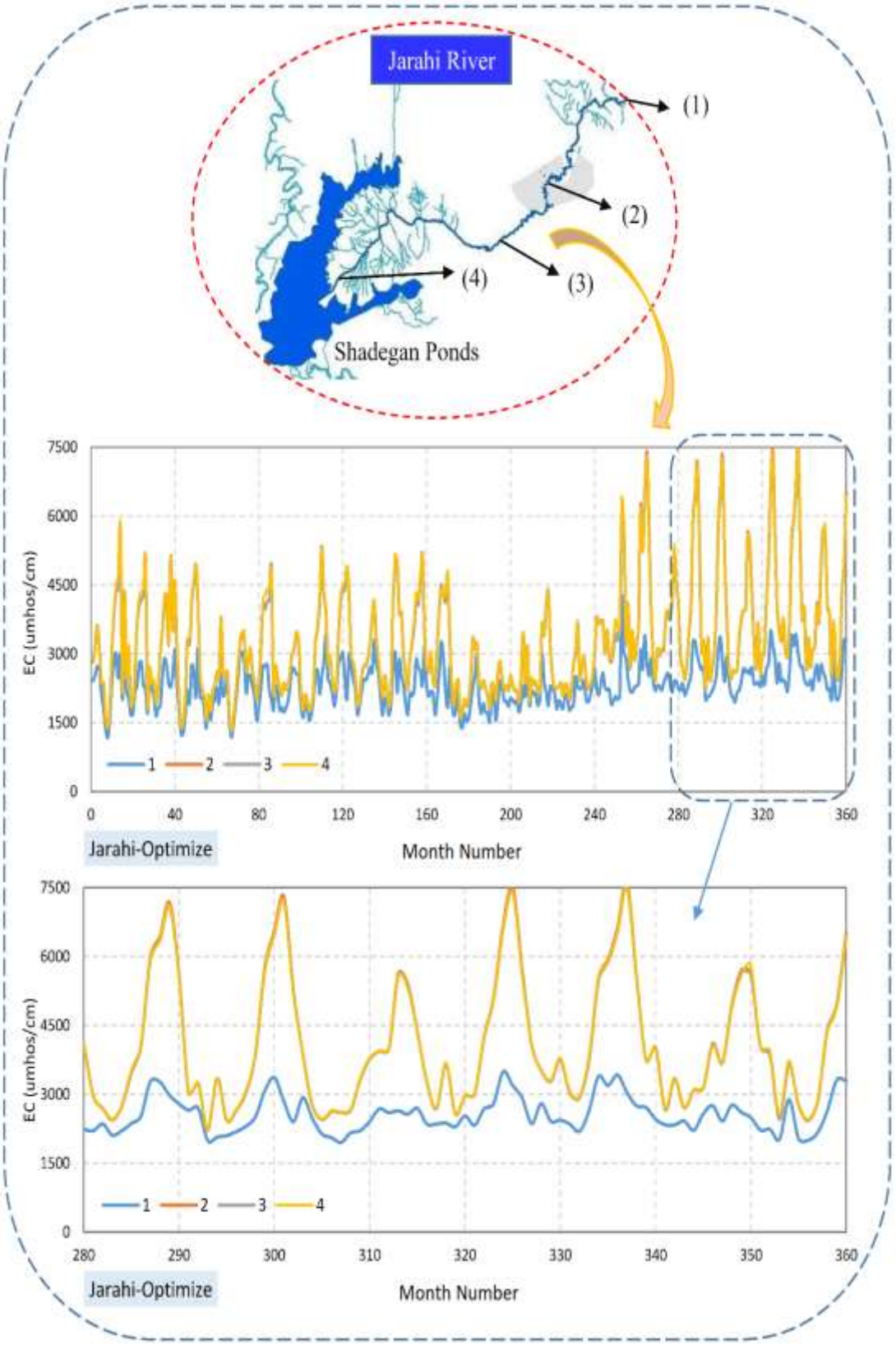

Figure 10. Salinity changes at different points of the Jarahi River during operation period- optimal scenario

ادامه وضع موجود منجر به نابودی کل اکوسیستم تالاب و البته رودخانه جراحی به‌عنوان تأمین‌کننده اصلی آب آن و ایجاد اثرات مخرب زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی در کل منطقه خواهد شد. لذا تهیه و تدوین مدلی بهینه که تمامی اجزای دخیل در بیلان و برنامه‌ریزی منابع آب بالادست این تالاب را لحاظ نموده و علاوه بر تأمین نیازها و مصارف منطقه، وضعیت کیفی پایین‌دست را نیز موردتوجه قرار دهد، امری ضروری است. از این‌رو، در این پژوهش با هدف تأمین نیاز زیست‌محیطی دریاچه شادگان، از یک مدل کوپل‌شده شبیه‌ساز- بهینه‌ساز استفاده شد که در آن الگوریتم تکاملی NSGA-II به مدل شبیه‌ساز WEAP متصل گردید. در سناریوی بهینه میزان جریان زیست‌محیطی ماهیانه بهینه در طول دوره بهره‌برداری به‌دست آمد و نتایج حاصل از اجرای آن با سناریوی رفرنس که براساس وضع موجود بهره‌برداری پایه‌گذاری شده بود مقایسه گردید. نتایج نشان داد مدل بهینه‌ساز، عملکرد خوبی در تأمین نیازهای مختلف و هم‌چنین کاهش شوری جریان ورودی به تالاب شادگان نسبت به سناریوی دارد. طوری‌که در سناریوی بهینه علاوه بر تأمین مناسب نیازها با اطمینان‌پذیری بیش از ۹۲ درصد در کل سیستم، مقدار شوری رودخانه در محل ورودی به تالاب شادگان به‌ویژه در ماه‌های کم‌آب در حدود ۵۰ درصد کاسته شود. در سایر نقاط موجود روی رودخانه جراحی نیز مقدار شوری آب به مقدار قابل‌توجهی کاهش یافت. نتایج نشان داد که با ترکیب مدل برنامه‌ریزی منابع آب و بهینه‌سازی سیستم براساس مدل کمی- کیفی توسعه داده‌شده می‌توان وضعیت تخصیص آب زیست‌محیطی تالاب را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشید اما این امر به تنهایی تمام مشکل منطقه را حل نخواهد کرد. علی‌رغم این‌که اجرای سناریوی بهینه بهترین نتیجه را ارائه می‌دهد، ولی در برخی از ماه‌ها هم‌چنان شوری جریان ورودی به تالاب شادگان از حد مجاز فراتر است که این امر نشان می‌دهد در کنار استفاده از ابزارهای برنامه‌ریزی منابع آب، گزینه های مدیریتی مانند کاهش سطح زیرکشت گیاهان پرمصرف و هم‌چنین افزایش راندمان آبیاری نیز باید مورد آزمون قرار گیرد. مدل کوپل‌شده پیشنهادی در این پژوهش قابل استفاده برای سایر مناطق مطالعاتی با رویکرد بهره‌برداری کمی- کیفی می‌باشد و قادر است نقاط بحرانی رودخانه از نظر کمی و کیفی را شناسایی و راه‌حل‌های بهینه برای بهبود وضعیت رودخانه و هم‌چنین اکوسیستم پایین‌دست ارائه دهد.

پی‌نوشت‌ها

1. A multi-objective environmental reservoir operation methodology
2. Three Gorges and Gezhouba Dams
3. Yangtze River basin
4. Ecological water use
5. Multi-Criteria decision analysis
6. Three Gorges Reservoir

منابع

۱. آذری آ. آخوندعلی ع.م. رادمنش ف. و حقیقی ع. (۱۳۹۳) مدیریت‌کیفیت و آلودگی رودخانه در شرایط بهره‌برداری تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی (بازه سد دز تا بندقیر). هفتمین همایش ملی و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. اکبرپور م. ابراهیمی ک. و هورفر ع. (۱۳۹۲). بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی با رویکرد کمی و کیفی (مطالعه موردی: دشت یزد- اردکان). پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران، انجمن علوم و مهندسی منابع‌آب ایران، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران.

۳. بازرگان لاری م. کراچیان ر. صدقی ح. فلاح نیا م. عابد علم دوست ا. و نیکو، م. (۱۳۸۹). تدوین قوانین احتمالاتی برای بهره‌برداری بهینه کمی- کیفی از منابع آب‌سطحی و زیرزمینی در زمان‌واقعی (کاربرد ماشین‌های بردار پشتیبان). آب و فاضلاب. (٤)٦٩:٢١-٥٤.

٤. رضوی طوسی س.ل. و محمدولی سامانی ج. (١٣٩٢) اولویت‌بندی مدیریتی تعدادی از حوضه‌های آبریز کشور با استفاده از روش‌های فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) و الگوریتم ترکیبی جدید براساس ANP-TOPSIS فازی. مدیریت آب و آبیاری، (٢) ٣: ٧٥-٩٠.

٥. غزالی م. روزبهانی ع. هنر ت. و محمدی ف. (١٣٩٤) اولویت‌بندی سناریوهای تخصیص آب سد زاینده رود به مصرف‌کنندگان مختلف؛ با رویکرد مدل‌های خبرهٔ تصمیم‌گیری چند شاخصه. مدیریت آب و آبیاری، (١) ٥: ٩٧-١١٣.

٦. مهر آذر آ. مساح بوانی ع. مشعل م. و رحیمی خوب ح. (١٣٩٥) مدل‌سازی یکپارچهٔ سیستم‌های منابع آب، کشاورزی و اقتصادی-اجتماعی دشت هشتگرد با رویکرد دینامیک سیستم‌ها. مدیریت آب و آبیاری، (٢) ٦: ٢٦٣-٢٨٠.

7. Ahmadianfar, I., Adib, A., & Salarijazi, M. (2015). Optimizing multireservoir operation: hybrid of bat algorithm and differential evolution. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 142 (2): 50150-10.
8. Arthington, A., Stuart, B., Robert, J.N., & LeRoy, P. (2006). The Challenge of Providing Environmental Flow Rules to Sustain River Ecosystems. *Ecological Applications*. 16: 1311-18.
9. Azari, A., Hamzeh, S., & Naderi, S. (2018). Multi-Objective Optimization of the Reservoir System Operation by Using the Hedging Policy. *Water Resources Management*. 32 (6): 2061-78.
10. Cai, W., Zhang, L., Zhu, X., Zhang, A., Yin, Y., & Wang, H. (2013). Optimized Reservoir Operation to Balance Human and Environmental Requirements: A Case Study for the Three Gorges and Gezhouba Dams, Yangtze River Basin, China. *Ecological Informatics*. 18: 40-48.
11. Cardwell, H., Jager, H. I. & Sale, M.J. (1996). Designing Instream Flows to Satisfy Fish and Human Water Needs. *Water Resources Planning and Management*. 22 (5): 356-363.
12. Carpitella, S., Brentan, B., Montalvo, I., Izquierdo, J., & Certa, A. (2019). Multi-criteria analysis applied to multi-objective optimal pump scheduling in water systems. *Water Supply*. 19 (8): 2338-2346.
13. Chen, D., Chen, Q., Leon, A. S., & Li, R. (2016). A Genetic Algorithm Parallel Strategy for Optimizing the Operation of Reservoir with Multiple Eco-Environmental Objectives. *Water Resources Management*. 30 (7): 2127-2142.
14. Chen, Q., Chen, D., Han, R., Li, R., Ma, J., & Blanckaert, K. (2012). Optimizing the Operation of the Qingshitan Reservoir in the Lijiang River for Multiple Human Interests and Quasi-Natural Flow Maintenance. *Environmental Sciences*. 24 (11): 1923-28.
15. Chen, D., Huang, G., Chen, Q., & Jin, F. (2010). Implementing Eco-Friendly Reservoir Operation by Using Genetic Algorithm with Dynamic Mutation. International Conference on Intelligent Computing for Sustainable Energy and Environment, International Conference on Life System Modeling and Simulation, Heidelberg, Berlin, 509-516.
16. Homa, E. S., Vogel, R. M., Smith, M. P., Apse, C. D., Huber-Lee, A., & Sieber, J. (2005). An Optimization Approach for Balancing Human and Ecological Flow Needs. *World Water and Environmental Resources Congress*., 1-12.
17. Hu, M., Huang, G. H., Sun, W., Ding, X., Li, Y. P., & Fan, B. (2016). Optimization and Evaluation of Environmental Operations for Three Gorges Reservoir. *Water Resources Management*. 30 (10): 3553-76.
18. Jackson, R. B., Carpenter, S. R., Dahm, C. N., Mcknight, D. M., Naiman, R. J., Postel, S. L., & Running, S. W. (2001). Water in a Changing World. *Ecological Applications*. 10 (3): 689-710.
19. Jager, H. I., & Smith, B. T. (2008). Sustainable Reservoir Operation: Can We Genarate Hydropower And Preserve Ecosystem Values. *River Research and Applications*. 24 (3): 340-352.
20. King, J., Brown, C., & Sabet, H. (2003). A Scenario-Based Holistic Approach to Environmental Flow Assessments for Rivers. *River Research and Applications*. 19(5-6): 619-39.
21. LeRoy, P. N., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegaard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., & Stromberg, J. C. (1997). The Natural Flow Regime A Paradigm for River Conservation and Restoration. *BioScience*. 47 (11): 769-784.
22. Li, R., Chen, Q., & Duan, C. (2011). Ecological Hydrograph Based on Schizothorax Chongi Habitat Conservation in the Dewatered River Channel between Jinping Cascaded Dams. *Science China Technological Sciences*. 54 (S1): 54-63.

23. Luo, J., Chen, C., & Xie, J. (2014). Multi-Objective Immune Algorithm with Preference-Based Selection for Reservoir Flood Control Operation. *Water Resources Management*. 29 (5): 1447-1466.
24. Mao, J., Zhang, P., Dai, L., Dai, H., & Hu, T. (2016). Optimal Opeartion of a Multi-Reservoir System for Environmental Water Demand of a River-Connected Lake. *Hydrology Research*. 47 (S1): 206-224.
25. Nikolic, V. V., & Simonovic, S. P. (2015). Multi-Method Modeling Framework for Support of Integrated Water Resources Management. *Environmental Processes*. 2(3): 461-483.
26. Rafiee Anzab, N., Mousavi, S.J., Rousta, B.A., & Kim, J.H. (2016). Simulation Optimization for Optimal Sizing of Water Transfer Systems. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Harmony Search Algorithm (ICHSA2015)*. 382: 365-375.
27. Shiau, J., & Wu, F. (2004). Assessment Of Hydrologic Alterarions Caused By CHI-CHI Diversion Weir In CHOU-SHUI Creek , Taiwan : Opporyunities For Restoring Natural Flow Conditions. *River Research and Applications*. 20 (4): 401-412.
28. Shiau, J., & Wu, F. (2007). Pareto-optimal solutions for environmental flow schemes incorporating the intra-annual and interannual variability of the natural flow regime. *Water Resources Research*. 43 (433): 1-12
29. Sieber, J., & Purkey, D. (2015). User guide for WEAP. Stockholm Environment Institute, U.S. Center.
30. Suen, J., & Eheart, J. W. (2006). Reservoir Management to Balance Ecosystem and Human Needs : Incorporating the Paradigm of the Ecological Flow Regime. *Water Resources Research*. 42 (3): 1-9.
31. Tennant, D.L. (1976). Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*. 1 (4): 6-10.
32. Tisdell, J. (2010). Acquiring Water for Environmental Use in Australia : An Analysis of Policy Options. *Water Resources Management*. 24 (8): 1515-1530.
33. Wang, R., & Lu, X. (2009). Quantitative Estimation Models and Their Application of Ecological Water Use at a Basin Scale. *Water Resour Manage*. 23 (7): 1351-1365.
34. Whiting, P. J. (2002). Streamflow Necessary for Environmental Maintenance. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 30 (1): 181-206.
35. Zeinali, M., Azari, A., & Heidari, M.M. (2020). Multi-objective optimization for water resource management in low flow areas based on a coupled surface water-groundwater model. *Water Resources Planning and Management*. 146 (5): 040200-20.