dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.132788.2689

Original Paper

Jouranl of Water and Wastewater, Vol. 30, No.5, pp: 31-43

# Surrogate Based Simulation-Optimization Approach in Optimal Operation of Waterbody Considering Quality and Quantity Aspects

***P. Yousefipoor[1], M. Saadatpour[2], A. Afshar [3]***

1. MSc of Environmental Engineering, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
2. Assist. Prof., School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
(Corresponding Author) msaadatpour@iust.ac.ir
3. Prof., School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

*(Received May 22, 2018 Accepted Nov. 2, 2018)*

**To cite this article:**
Yousefipoor, P., Saadatpour, M., Afshar, A., 2019, "Surrogate based simulation-optimization approach in optimal operation of waterbody considering quality and quantity aspects." Journal of Water and Wastewater, 30(5), 31-43. Doi: 10.22093/wwj.2018.132788.2689. (In Persian)

## Abstract

In this research, deriving optimal reservoir operation in selective withdrawal scheme considering quality and quantity aspects has been studied. Surrogate based simulation-optimization approach (SBSOA) has been applied to improve downstream water supply and enhance reservoir outflow water quality. CE-QUAL-W2 as the hydrodynamic and water quality simulation model in the river-reservoir system and multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) algorithm as an efficient tool have been applied in simulation-optimization (SO) approach. To overcome the computational burdens of multiple calls of CE-QUAL-W2, as a numerical high fidelity model, various surrogate models have been developed to simulate reservoir outflow water quality parameters (DO, $NO_3$, $PO_4$, BOD, and Fe). The developed surrogate models and mass balance model have been coupled with MOPSO algorithm in SBSOA. In this study, the water quality objective function is defined as water quality index (WQI), which integrates various water quality parameters, DO, $NO_3$, $PO_4$, BOD, and Fe. The proposed approach has been applied in Ilam river-reservoir system to derive optimal reservoir operating strategies in the selective withdrawal scheme. The results show suitable efficiency and accuracy of the developed surrogate models in approximation of various water quality parameters compared with CE-QUAL-W2 simulation results (the approximation error of DO, $NO_3$, $PO_4$, Fe, and BOD has been respectively 3%, 1%, 2%, 2%, 3%). The studies indicate enhancing reservoir outflow water quality is consistent with downstream water supply satisfaction. It means, the increasing of reservoir outflow rate leads to the reservoir detention time decreasing, pollutant settling rate reductions, and chemical/biological reaction attenuation.

***Keywords:*** MOPSO Algorithm, CE-QUAL-W2, LIBSVM Model, Simulation-Optimization.

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.132788.2689

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۰، شماره ۵، صفحه: ۴۳-۳۱

# رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی مبتنی بر فرامدل در بهره‌برداری بهینه منابع آبی با در نظر گرفتن جنبه‌های کمّی و کیفی

پریسا یوسفی‌پور[۱]، مطهره سعادت‌پور[۲]، عباس افشار[۳]

۱- کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
۲- استادیار، گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) msaadatpour@iust.ac.ir
۳- استاد، گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

(دریافت ۹۷/۳/۱ پذیرش ۹۷/۸/۱۱)

**برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:**
یوسفی‌پور، پ.، سعادت‌پور، م.، افشار، ع.، ۱۳۹۸، " رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی مبتنی بر فرامدل در بهره‌برداری بهینه منابع آبی با در نظر گرفتن جنبه‌های کمی و کیفی" مجله آب و فاضلاب، ۳۰(۵)، ۴۳-۳۱. **Doi: 10.22093/wwj.2019.132788.2689**

## چکیده

**در این پژوهش، بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن در ساختار برداشت انتخابی با در نظر گرفتن جنبه‌های کمّی و کیفی منابع آب مورد بررسی قرار گرفت. حل این مسئله بزرگ مقیاس، با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی بهینه‌سازی مبتنی بر فرامدل با هدف ارتقاء تأمین نیازهای آبی پایین‌دست و بهبود کیفیت جریان آب خروجی از مخزن مورد توجه این پژوهش بوده است. شبیه‌سازی هیدرودینامیک و کیفیت سیستم رودخانه- مخزن مورد بررسی، توسط مدل دو بعدی هیدرودینامیک و کیفیت آب CE-QUAL-W2 انجام و الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه هوش جمعی ذرات به‌عنوان ابزار بهینه‌سازی به‌کار گرفته شد. با توجه به لزوم فراخوانی‌های متعدد مدل CE-QUAL-W2 توسط الگوریتم بهینه‌سازی در رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی و نیز حجم محاسباتی زیاد این مدل عددی در تخمین پارامترهای کیفیت آب جریان خروجی از مخزن، مدل/مدل‌های جایگزین تقریب غلظت پارامترهای کیفی جریان خروجی مخزن، از جمله اکسیژن محلول، نیترات، فسفات، BOD و آهن در پژوهش حاضر توسعه یافت. در ادامه ارتباط میان الگوریتم بهینه‌سازی و مدل‌های جایگزین تقریب کیفیت و مدل موازنه حجم آبی در مخزن دنبال شد. تابع هدف کیفی این مسئله بهینه‌سازی به‌صورت شاخص کیفیت تجمیع کننده زیرشاخص‌های غلظت پارامترهای متعدد کیفی تعریف شد. رویکرد پیشنهادی در این بررسی به‌منظور استخراج الگوی بهینه بهره‌برداری از مخزن در ساختار برداشت انتخابی در سیستم رودخانه- مخزن ایلام مورد آزمون قرار گرفت. نتایج بیانگر کارایی و دقت قابل توجه مدل‌های جایگزین توسعه داده شده در تقریب غلظت پارامترهای متعدد کیفی خروجی از مخزن در مقایسه با مدل CE-QUAL-W2 بود. خطای تقریب اکسیژن محلول، نیترات، فسفات، آهن و BOD به‌ترتیب ۳، ۱، ۲، ۲ و ۳ درصد بود. همچنین نتایج، ارتقاء کیفیت جریان خروجی و بهبود تأمین نیاز آبی پایاب مخزن ایلام را نشان داد. دلیل این رویداد، افزایش برداشت از مخزن، کاهش زمان ماند و به تبع آن کاهش فرصت ته‌نشینی آلاینده‌ها و رخداد واکنش‌های شیمیایی است.**

***واژه‌های کلیدی:*** الگوریتم چند هدفه هوش تجمعی ذرات، CE-QUAL-W2، مدل ماشین بردار پشتیبان، شبیه‌سازی-بهینه‌سازی

## ۱- مقدمه

با توجه به محدودیت‌های دسترسی به منابع آب سالم، مدیریت و بهره‌برداری بهینه از مخازن آبی برای تأمین تقاضا در طول یک افق برنامه‌ریزی بسیار مهم و حیاتی است (Karamouz et al., 2008). مخازن به‌عنوان سازه‌های هیدرولیکی ذخیره منابع آب شیرین، سبب سکون و تجمیع حجم آب جاری جریان طبیعی رودخانه در پشت سد می‌شوند. اگرچه امکان بهبود کیفیت آب از طریق اقدامات سازه‌ای به‌عنوان اقدامی قابل بررسی در مدیریت منابع آب سطحی مطرح است، اما به‌دلیل هزینه‌های زیاد اجرایی و محدودیت بودجه

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.132788.2689


در زمینه‌های محیط زیستی به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه، پرداختن به مباحث هیدرولیکی مانند تغییر زمان ماند و الگوی جریان در مدیریت کیفیت منابع آب، گامی مؤثر و اقتصادی محسوب می‌شود (Javaheri and Saadatpour, 2017).

شیوه‌های کنونی مدیریت آب عمدتاً به سمت استفاده‌های کمّی، هدفمند شده‌اند و کیفیت به‌عنوان مسئله مستقل به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از دلایل عدم پرداختن به مسائل کیفیت در کنار کمیّت منابع آبی متأثر از ناکارآمدی روش‌های بهینه‌سازی و عدم دسترسی به مدل‌های مناسب شبیه‌سازی هیدرودینامیک و کیفیت آب است (Castelletti et al., 2013).

در طی چند دهه گذشته، پژوهش‌هایی با هدف بررسی اثر بهره‌برداری از مخزن در ساختار برداشت انتخابی بر کیفیت آب جریان خروجی از مخزن انجام شده است (Ma et al., 2008, Chung and Gu, 2009, Narasimhan et al., 2010, Suen and Wang, 2010, Castelletti et al., 2013 and Saadatpour and Afshar, 2013).

کراچیان و کارآموز مدل غیرقطعی حل اختلاف را به‌منظور مدیریت کمّی و کیفی سیستم رودخانه-مخزن با هدف تأمین نیازهای کمّی پایین‌دست و رعایت استاندارد کیفیت ارائه نمودند. متغیرهای تصمیم در مسئله مورد نظر ایشان، تعیین مقدار رهاسازی جریان از هر یک از آبگیرهای مخزن و مقدار حذف آلاینده‌های نقطه‌ای پایین‌دست بوده است. مدل شبیه‌سازی کیفیت یک بعدی به‌منظور شبیه‌سازی کیفیت شوری در سیستم رودخانه- مخزن در کار ایشان توسعه داده شد. به‌منظور تعیین مقدار بهینه متغیرهای تصمیم از نسخه توسعه داده شده الگوریتم بهینه‌سازی SVLGAQ[1] استفاده شد (Kerachian and Karamouz, 2007).

کارآموز و همکاران مدیریت و بهره‌برداری بهینه منابع آبی با در نظر گرفتن جنبه‌های کمی و کیفی را در سد کرخه مورد بررسی قرار دادند. به‌منظور حل مسئله تخصیص بهینه آب در سیستم رودخانه- مخزن از ارتباط ابزارهای الگوریتم ژنتیک و مدل‌های شبیه‌ساز کیفی یک بعدی Qual2e و WQRRS[2] استفاده نمودند. تابع هدف مسئله مبتنی بر تئوری نش[3] با در نظر گرفتن توابع مطلوبیت تصمیم‌گیرندگان و ذینفعان و همچنین اختیارات نسبی آنها در فرایند تخصیص آب تعریف شد. توابع مطلوبیت بر مبنای اعتمادپذیری به تخصیص آب به بخش‌های مختلف، برطرف نمودن تقاضاهای محیط زیستی آب (کیفیت آب تخصیص‌یافته و کمیّت آن)، کافی بودن آب ذخیره شده در مخزن و مناسب بودن کمیّت و کیفیت جریان برگشتی بوده است (Karamouz et al., 2008).

سلیمانی و همکاران استخراج دستورالعمل نسبت برداشت انتخابی از مخزن با فرض تراز ثابت خروجی‌های آبگیر و با هدف کنترل دمای آب خروجی مخزن را ارائه نمودند. رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مبتنی بر فرامدل در بررسی ایشان به‌منظور کنترل دمای آب خروجی از مخزن ارائه شده است. شبیه‌سازی دمای آب خروجی مخزن کرخه توسط مدل CE-QUAL-W2 صورت پذیرفت که با توجه به هزینه محاسباتی زیاد، از فرامدل LIBSVM[4] به‌عنوان ابزاری در توسعه مدل جایگزین استفاده شد. سپس مدل LIBSVM به الگوریتم ژنتیک ارتباط داده شد تا مدل LIBSVM-GA برای حل مسئله به‌کار گرفته شود (Soleimani et al., 2016).

امیرخانی و همکاران در سال ۲۰۱۶ مدیریت بهره‌برداری از مخزن سد کرج را با هدف کمینه کردن تخطی غلظت شوری جریان خروجی مخزن نسبت به مقدار استاندارد مورد بررسی قرار دادند. برای حل مسئله از ارتباط میان CE-QUAL-W2 و الگوریتم NSGA-II[5] استفاده شد. استخراج سیاست بهینه بهره‌برداری از مخزن تحت چهار سناریوی فصلی دنبال و نتایج مناسبی به‌منظور بهبود عملکرد مخزن حاصل شد (Amirkhani et al., 2016).

در پژوهش صورت گرفته توسط سعادت‌پور و همکاران، نتایج بهره‌برداری بهینه از مخزن در ساختار برداشت انتخابی با اهداف کاهش تخطی دمای جریان خروجی از مخزن نسبت به شرایط طبیعی رودخانه در دوره زمانی اواسط اسفند تا اواسط خرداد (ماه‌های تخم‌ریزی ماهیان بومی رودخانه)، افزایش تولید انرژی برقابی و افزایش تأمین نیاز کشاورزی و محیط زیستی پایاب ارائه شده است (Saadatpour et al., 2017).

در این پژوهش، مدیریت بهره‌برداری از مخزن در ساختار برداشت انتخابی در یک سیستم رودخانه-مخزن مورد بررسی قرار

[1] Stochastic Varying Chromosome Length Genetic Algorithm
[2] Water Quality for River-Reservoir Systems (WQRRS)
[3] Nash Equilibrium
[4] A Library for Support Vector Machines
[5] Non Dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.132788.2689

گرفت. در مدیریت بهره‌برداری از این سیستم آبی، بهبود تأمین نیازهای پایاب و ارتقاء کیفیت جریان خروجی از مخزن (پارامترهای کیفی مؤثر بر فرایند تغذیه‌گرایی و آهن) در نظر گرفته شد. رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مورد استفاده در این پژوهش مبتنی بر نسخه چندهدفه هوش جمعی ذرات[1] و مدل عددی CE-QUAL-W2 در سیستم رودخانه-مخزن است. با توجه به زمان اجرای طولانی مدل CE-QUAL-W2 و تعدد تکرارهای زیاد برای همگرایی در رویکرد "شبیه‌سازی-بهینه‌سازی"، توسعه مدل جایگزین در دستور کار این پژوهش‌ها قرار گرفت. در این پژوهش از مدل داده‌کاوی ماشین‌بردار پشتیبان[2] و ابزار LIBSVM برای تخمین پاسخ‌های مدل عددی هیدرودینامیک و کیفیت آب در جریان خروجی مخزن، استفاده شد. توسعه مدل‌های داده‌کاوی با هدف تعیین پاسخ کیفی مخزن، شامل غلظت پارامترهای کیفی DO، نیترات، فسفات، آهن و BOD در جریان خروجی سد، متأثر از سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن در ساختار برداشت انتخابی صورت گرفت.

در ادامه، مدل‌های داده‌کاوی توسعه داده شده در محیط LIBSVM به الگوریتم بهینه‌سازی ارتباط داده شد تا در فرایند هوشمند رفت و برگشتی، استراتژی‌های بهینه بهره‌برداری از مخزن در ساختار برداشت انتخابی با در نظر گرفتن جنبه‌های کمّی و کیفی، مبتنی بر شاخص ارائه شده توسط سوامی و تیاجی استخراج شود (Swamee and Tyagi, 2000).

رویکرد پیشنهادی در این پژوهش در سیستم رودخانه- مخزن ایلام مورد آزمون قرار گرفت. اگرچه این رویکرد و ابزارهای مورد استفاده در این بررسی به تنهایی نوین محسوب نمی‌شوند، اما ترکیب ابزارهای مورد استفاده در پرداختن به مسئله تعیین استراتژی بهینه بهره‌برداری از مخزن در ساختار برداشت انتخابی در سیستم رودخانه- مخزن با پیچیدگی‌های طولی و عمقی، رفتار دو بعدی، ورود شاخه‌های فرعی متعدد از مکان‌های مختلف و نیز پرداختن توأم به مسئله تغذیه‌گرایی و آهن، در پژوهش‌های گذشته کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

به‌عبارتی مواجهه با چالش‌های دینامیک بودن شرایط هواشناسی، هیدرولوژیکی، کیفی و نحوه بهره‌برداری از مخزن در دراز مدت، ارتباط و اندرکنش میان پارامترهای کیفی متعدد و ترکیب استفاده از ابزارهای مورد اشاره در پیکره آبی پیچیده و بزرگ مقیاس از نظر مکانی و زمانی و نوع مشکلات کیفی مواجهه با آن مانند بررسی آلاینده سمّی آهن و پارامترهای کیفی مؤثر بر تغذیه گرایی، به‌ندرت در پژوهش‌های گذشته، گزارش شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مورد پژوهشی

رویکرد پیشنهادی در این کار پژوهشی برای سیستم رودخانه- مخزن ایلام مورد استفاده قرار گرفت. سد ایلام در ۲۲ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان ایلام بر روی رودخانه کنجانچم قرار دارد. این سد دارای گنجایش ۷۱ میلیون مترمکعب، رقوم نرمال و تراز بستر ۹۵۶ و ۹۰۵ متر از سطح دریا است. استفاده گسترده از آب سد ایلام در تأمین نیازهای شرب و کشاورزی، حساسیت اهمیت سلامت کیفیت آب سد مزبور را بیان می‌دارد.

اطلاعات و نقشه‌های توپوگرافی، کیفی، هیدرولوژیکی، نیازهای آبی، شماتیک منابع و مصارف، سازه‌های هیدرولیکی طرح و اطلاعات هواشناسی این سد بر اساس طرح مطالعات تکمیلی آب شرب دراز مدت شهر ایلام (MGCE, 2011) و سایت سازمان هواشناسی تهیه شد.

تأمین آب شرب شهری ایلام، تأمین آب مورد نیاز شبکه دشت امیرآباد و حقابه‌های دشت مهران از اهداف بهره‌برداری از مخزن ایلام بوده است. بر اساس گزارش مطالعات تکمیلی تأمین دراز مدت آب شرب شهر ایلام، طی ماه‌های مرداد، شهریور، فروردین و اردیبهشت تخطی غلظت آهن از حد استاندارد شرب ایران (300 ppb) در مخزن مشاهده شده است. افزایش غلظت آهن در لایه زیرین ناشی از آزادسازی این عنصر در شرایط بی‌هوازی بوده که نشان دهنده وجود این فلز به‌عنوان یک عامل ایجاد طعم در آب مخزن سد ایلام است. همچنین بر اساس این گزارش، مخزن سد ایلام در شرایط مزوتروفیک[3] (تغذیه گرایی متوسط) و یوتروفیک[4] (تغذیه گرایی نسبتاً بالا) قرار دارد (MGCE, 2011). موقعیت طولی شاخه‌های فرعی متعدد سیستم رودخانه- مخزن ایلام و محل قرارگیری شاخه‌های اما، گل‌گل و چاویز نسبت به یکدیگر

[1] Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOSPSO)
[2] Support Vector Machine (SVM)
[3] Mesotrophic
[4] Eutrophic

(پیاده‌سازی شده در مدل CE-QUAL-W2) در شکل ۱ ارائه شده است.

رودخانه گل‌گل اصلی‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه ورودی به مخزن سد ایلام است. آماده‌سازی مدل CE-QUAL-W2 سیستم رودخانه و مخزن ایلام، با تعریف ۴۰ قطعه محاسباتی در رودخانه (طول حدود ۲۰ کیلومتر) و ۱۴ قطعه محاسباتی در مخزن (طول حدود ۸ کیلومتر) صورت پذیرفت. تعداد ۴۱ لایه محاسباتی با عمق نیم تا یک متر در رودخانه و بازه یک تا دو متر در مخزن در نظر گرفته شد. جریان‌های فرعی ورودی از زیرحوضه‌های گل‌گل (۵ شاخه فرعی)، نقش اصلی در آلودگی این پیکره آبی را ایفاء می‌نمایند. مخزن ایلام به‌صورت مخزنی شاخه‌ای و متشکل از سه شاخه (اما، گل‌گل و چاویز) در مدل CE-QUAL-W2 تعریف شد.

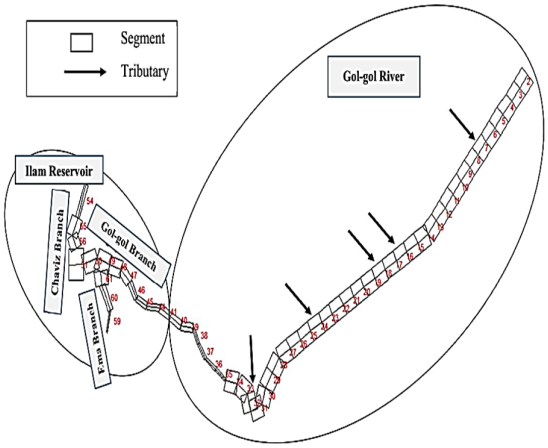


**Fig. 1.** The main branches of Ilam reservoir and tributaries of Gol-Gol river

**شکل ۱**- موقعیت قرارگیری شاخه‌های جریان ورودی به مخزن ایلام و شاخه‌های فرعی ورودی به سیستم رودخانه گل‌گل

## ۲-۲- رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی

کیفیت آب پیکره‌های آبی در ابعاد زمانی و مکانی متأثر از منابع آلاینده نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای ورودی به آنها، فرایندهای انتقال و چرخش جرم و زمان ماند آلودگی در پیکره آبی است. رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مورد استفاده در این پژوهش، بر ارائه چارچوبی به‌منظور تأمین توأم اهداف کمّی و کیفی در بهره‌برداری از مخازن آبی در ساختار برداشت انتخابی تأکید دارد.

### ۲-۲-۱- مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2

مدلی که به‌منظور شبیه‌سازی کیفیت منابع آبی در این پژوهش مورد نیاز است، باید توانایی شبیه‌سازی رفتار کیفی سیستم در طول زمان (دینامیک بودن)، شبیه‌سازی تغییرات رفتار کیفی سیستم رودخانه- مخزن (پیکره‌های آبی متحرک و ساکن) در دو بعد طولی و قائم در مخزن، قابلیت منظور نمودن اثر جریان طولی از شاخه‌های ورودی متصل به مخزن، برداشت طولی از مخزن، جامع بودن مدل به لحاظ منظور نمودن روابط هیدرودینامیک و کیفیت منابع آب، قابلیت شبیه‌سازی پارامترهای کیفی فرایند تغذیه‌گرایی و آهن، شبیه‌سازی سازه‌های هیدرولیکی متعدد، منظور نمودن سری زمانی دبی و کیفیت جریان‌های متعدد ورودی به پیکره آبی، شبیه‌سازی شرایط بی‌هوازی، منظور نمودن اثر محل برداشت آب، در دسترس بودن کد برنامه و نیز مجوز استفاده از برنامه به‌صورت رایگان را داشته باشد. با در نظر گرفتن کلیه این ویژگی‌ها، مدل CE-QUAL-W2 به‌عنوان شبیه‌ساز دو بعدی هیدرودینامیک و کیفیت سیستم رودخانه- مخزن ایلام در این پژوهش انتخاب شد.

در این پژوهش ابتدا با جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2 برای سیستم رودخانه-مخزن ایلام آماده شد. سپس با استفاده از داده‌های هیدرودینامیکی و کیفی سال‌های ۸۸ تا ۸۹ برای تراز سطح آب، دما و پارامترهای کیفی اکسیژن محلول، نیترات، فسفات، آهن، BOD، جلبک، جامدات معلق و شوری کالیبره شد.

### ۲-۲-۲- ماشین بردار پشتیبان

ماشین بردار پشتیبان یکی از روش‌های یادگیری با نظارت[1] است که از آن برای طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده می‌شود. از مدل طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان برای حل مسائل طبقه‌بندی داده‌هایی که در کلاس‌های مختلف قرار می‌گیرند، استفاده می‌شود و مدل رگرسیون ماشین بردار پشتیبان در حل مسائل پیش‌بینی، کاربرد دارد. مدل رگرسیون به وسیله معادله ۱ ارتباط متغیر وابسته y به متغیر مستقل x را تخمین می‌زند. تابعی که متغیرهای مستقل و وابسته را به هم مربوط می‌سازد دارای یک جمله ساختاری و یک خطا[2] است (Vapnik, 1999).

[1] Supervised Learning
[2] Noise

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.132788.2689

$$y = f(x) + noise \quad (۱)$$

تابع بهینه رگرسیون با کمینه کردن تابع زیر بیان می‌شود

$$\text{Minimize} \quad \left(\frac{1}{2}w^T w + C\sum_{i=1}^{I}\left(\xi_i^- + \xi_i^+\right)\right) \quad (۲)$$

$$\text{Subject to} \begin{cases} w^T\phi(x_i) + b - y_i \le \varepsilon + \xi_i^- \\ y_i - w^T\phi(x_i) - b \le \varepsilon + \xi_i^+ \\ \xi_i, \xi_i^* \ge 0 \quad i = 1,2,...,I \end{cases} \quad (۳)$$

که در آن

C یک مقدار از پیش تعیین شده بوده و $\xi_i^-, \xi_i^+$ متغیرهایی برای مشخص‌سازی قیود بالا و پایین خروجی سیستم است. اگر داده‌ها به‌صورت خطی مجزا از هم باشند، یک سطح بهینه که داده‌ها را بدون خطا و با حداکثر فاصله میان صفحه و نقاط آموزشی (بردارهای پشتیبان) تفکیک می‌نماید، آموزش می‌دهد. اگر نقاط آموزشی به‌صورت $[x_i, y_i]$ و بردار ورودی $x \in R^n$ تعریف شود، در حالتی که داده‌ها به‌صورت خطی قابل تفکیک باشند، معادله به‌صورت زیر است

$$y = f(x) = sign\left[\sum_{i=1}^{N} y_i a_i (x_i, x) + b\right] \quad (۴)$$

که در آن

y خروجی معادله و $y_i$ ارزش طبقه نمونه آزمایشی $x_i$ است. اگر داده‌ها به‌صورت خطی قابل تفکیک نباشند، می‌توان با اعمال پیش پردازش، نمونه‌ها را به فضایی بالاتر برد. در این حالت از معادله زیر استفاده می‌شود

$$y = f(x) = sign\left[\sum_{i=1}^{N} y_i a_i k(x_i, x) + b\right] \quad (۵)$$

تابع $k(x_i,x)$، تابع کرنلی[1] است که از طریق ضرب‌های داخلی، ماشین‌هایی با انواع مختلفی از سطوح غیرخطی در فضای داده‌ها ایجاد می‌کند. برای مدل رگرسیون ماشین بردار پشتیبان از کرنل‌های مختلفی مانند خطی، درجه دوم، گوسی و چند جمله‌ای استفاده می‌شود (Vapnik, 1999).

### ۲-۲-۳- الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات

الگوریتم هوش جمعی ذرات از روش‌های نوین و پرکاربرد بهینه‌سازی در مسائل بزرگ مقیاس مدیریت منابع آب است (Meraji et al., 2005, Kumar and Reddy, 2007, Celeste and Billib, 2009, Ostadrahimi et al., 2012).

در الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات، ذرات در فضای جستجو جاری می‌شوند. تغییر مکان ذرات در فضای جستجو تحت تأثیر تجربه و دانش خودشان و همسایگانشان است. اساس کار الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات بر این اصل استوار است که در هر لحظه هر ذره، مکان خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین مکانی که تاکنون در آن قرار گرفته است و بهترین مکانی که در کل همسایگی‌اش وجود دارد، تنظیم می‌کند. مسئله مورد بررسی یک مسئله بهینه‌سازی دو هدفه است که در آن دو تابع هدف باید به‌صورت همزمان بهینه شوند. هدف از حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه یافتن جواب‌های نامغلوب یا جمعیتی از بهترین جواب‌ها است. در این پژوهش الگوریتم بهینه‌سازی برای حل مسئله بر اساس ۵۰ ذره و ۱۰۰۰ تکرار تنظیم شد. همچنین متغیرهای آزاد الگوریتم شامل ضرایب یادگیری فردی و اجتماعی، وزن و چگونگی تغییر هر یک از این پارامترها در طول تکرار الگوریتم بر اساس آنالیز حساسیت انتخاب شدند.

### ۲-۲-۴- توابع هدف

هدف اصلی در این پژوهش، کمینه‌سازی مجذور کمبود نیاز آبی پایین‌دست و بیشینه‌سازی شاخص کیفیت است. توابع هدف و قیودات مسئله به‌صورت زیر هستند. متغیرهای تصمیم این مسئله نسبت برداشت از آبگیر پایینی و میزان دبی خروجی تعریف شدند

$$\text{Minimize} \sum_{j=1}^{14}\sum_{m=1}^{12}\sum_{d=1}^{30}\left(outflow_{y,m,d} - Demand_{y,m,d}\right) \quad (۶)$$

$$\text{Maximize} \sum_{i=1}^{D}\left((1 - N + NO3wqi_i + PO4wqi_i + BODwqi_i + DOwqi_i + Fewqi_i)^{-2.5}\right)^{-0.4} / D \quad (۷)$$

[1] Kernel Function

$$S_{t+1} = S_t + I_t - E_t - RD_t - Spill_t \qquad \forall t = 1,2,...,T \qquad (۸)$$

$$E_t = Evp_t . ResArea_t \qquad \forall t = 1,2,...,T \qquad (۹)$$

$$RD_t = \sum_{w=1}^{2} RD_t^w \qquad \forall t = 1,2,...,T \qquad (۱۰)$$

$$RD_t^1 = \begin{cases} 0 & Elev_t < WSE_{OUTLET\,1} \text{ Or } Elev_{t+1} < WSE_{OUTLET\,1} \\ RD_t^1 & \end{cases} \qquad (۱۱)$$

$$\forall t = 1,2,...,T$$

$$outflow_{y,m,d} = \begin{cases} RD_t & RD_t < Demand_t \\ Demand_t & Else \end{cases} \qquad (۱۲)$$

$$\forall t = 1,2,...,T$$

$$0 \le RD_t \le AFlow_t \qquad \forall t = 1,2,...,T \qquad (۱۳)$$

$$S_{min} \le S_t \le Cap \qquad \forall t = 1,2,...,T \qquad (۱۴)$$

$$Spill_t = \begin{cases} 0 & S_{t+1} \le Cap \\ S_t + I_t - E_t - RD_t - S_{t+1} & Else \end{cases} \qquad (۱۵)$$

که در معادلات بالا outflow دبی خروجی، Demand نیاز آبی پایین‌دست (نیاز آبی شرب، دشت امیرآباد، اراضی مهران، توسعه اراضی)، y تعداد سال‌ها، m تعداد ماه و d تعداد روزهای کنترل در هر ماه در محاسبه توابع هدف هستند. $NO3wqi_i$، $PO4wqi_i$، $BODwqi_i$، $DOwqi_i$، $Fewqi_i$ به‌ترتیب، شاخص‌های نیترات، فسفات، BOD، اکسیژن محلول و آهن در روز کنترل i هستند، همچنین D تعداد روزهای کنترل شاخص کیفی است که در این کار پژوهشی کنترل در بازه‌های زمانی ۵ روزه صورت پذیرفته است. غلظت هر یک از پارامترهای کیفی مورد اشاره توسط مدل جایگزین توسعه داده شده با استفاده از ابزار LIBSVM تخمین زده می‌شود. Cap برابر با حجم بیشینه مخزن، $S_{min}$ برابر با حجم کمینه مخزن، $S_t$ حجم آب مخزن، $I_t$ حجم ورودی آب به مخزن، $E_t$ حجم تبخیر آب از سطح مخزن، $Spill_t$ حجم جریان سرریزی از مخزن، $RD_w^t$ حجم آب خروجی از دریچه شماره w برای تأمین نیازهای آبی پایین دست در روز t هستند. $Evp_t$ و $ResArea_t$ به‌ترتیب ارتفاع تبخیر و سطح مخزن در گام زمانی t است. ارتفاع تبخیر بر اساس گزارش‌های هواشناسی و برنامه‌ریزی منابع آب سد ایلام و سطح مخزن نیز بر اساس منحنی- سطح- حجم ارتفاع مخزن ایلام و به‌صورت تابعی از حجم مخزن در آن گام زمانی محاسبه می‌شود. میزان جریان خروجی از آبگیر بالایی ($RD_t^1$) در هر گام زمانی با کنترل تراز سطح آب مخزن (Elev) در ابتدا و انتهای آن گام زمانی کنترل می‌شود. یعنی اگر تراز سطح آب مخزن پایین‌تر از تراز قرارگیری آبگیر فوقانی ($WSE_{OUTLET1}$) باشد، میزان برداشت از آبگیر فوقانی صفر و مقدار تخصیص داده شده به آبگیر فوقانی توسط الگوریتم بهینه سازی، به آبگیر پایینی اختصاص می‌یابد (معادله ۱۱). بر اساس معادله ۱۲، در محاسبه تابع هدف کمّی مسئله (محاسبه کمبود نیاز آبی؛ معادله ۶) میزان جریان خروجی از دریچه‌ها به‌عنوان آب اختصاص یافته به تأمین نیازهای آبی لحاظ می‌شود. حجم آب خروجی از دریچه‌ها بر اساس تحلیل آماری سری زمانی ماهانه آورد رودخانه ایلام، میزان نیاز ماهانه و ظرفیت آبگیرهای این مخزن به $AFlow_t$ محدود شده است (معادله ۱۳). سرریز نیز در شرایطی به وقوع می‌پیوندد که حجم مخزن از مقدار حداکثر حجم یا حجم نرمال تجاوز نماید (معادله ۱۵).

## ۲-۳- مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مبتنی بر فرامدل

الگوریتم‌های تکاملی برخلاف کارایی بالایی که در حل مسائل پیچیده مهندسی آب دارند، به‌دلیل تعدد فراخوانی مدل‌های شبیه‌سازی برای ارزیابی تابع هدف کیفی، محدودیت‌های زمانی و محاسباتی را در حل مسئله ایجاد می‌کنند. این هزینه‌ها در صورت نیاز به فراخوانی مدل‌های چند بعدی شبیه‌سازی عددی هیدرودینامیک و کیفیت منابع آب، غیرقابل کنترل می‌شوند. در چنین مواردی استفاده از روش مدل‌های جایگزین یا رویکردهای فرامدل، به‌منظور حل این گونه مسائل پیشنهاد شده است. در این پژوهش، مدل/مدل‌های جایگزین به‌منظور تقریب پاسخ‌های مدل عددی شبیه‌سازی هیدرودینامیک و کیفیت مخزن و ارزیابی تابع

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.132788.2689

برازندگی کیفی مورد استفاده قرار گرفت. هدف مدل‌های جایگزین، تقریب رفتار کل سیستم نبود و تنها بیان با دقت ارتباط میان متغیرهای تصمیم، متغیرهای حالت و تابع برازندگی مد نظر بود. مدل‌های داده‌کاوی ابزارهایی کارا و مؤثر در ترسیم پاسخ سیستم‌های منابع آبی متأثر از راهکارهای مختلف مدیریتی، ضمن حفظ دقت و سرعت انجام کار هستند (Saadatpour, 2012).

### ۲-۳-۱- تعیین داده‌های ورودی مدل داده‌کاوی برای مدل‌سازی پارامترهای متعدد کیفی (نیترات، فسفات، آهن، اکسیژن محلول و BOD)

انتخاب داده‌های ورودی مناسب گامی مهم در فرایند توسعه مدل داده‌کاوی است. داده‌های فرعی یا دربردارنده همبستگی بسیار زیاد، زمان آموزش را افزایش می‌دهند و کارایی مدل را مختل می‌کنند. در حالی که حذف داده‌های مهم سبب می‌شود مدل نتواند به‌طور کامل رابطه بین داده‌های ورودی و خروجی را تشریح نماید. انتخاب داده‌های ورودی مدل/مدل‌های جایگزین در این پژوهش، بر اساس معادلات و توابع کیفیت در مدل عددی CE-QUAL-W2، معادلات توازن جرم برای لایه‌های محاسباتی، ارتباط و بازخورد میان مؤلفه‌های کیفی، داده‌های هیدرولوژیکی، هواشناسی و هیدرولیکی سیستم، تأخیر زمانی میان داده‌های ورودی و پاسخ‌های کیفی سیستم صورت گرفت (Cole and Wells, 2006, Javaheri and Saadatpour, 2017).

بر اساس روابط حاکم بر میزان غلظت اکسیژن محلول و آهن، داده‌های ورودی به مدل داده کاوی تقریب اکسیژن محلول در نقطه خروجی سد متوسط ۱۵روزه دمای هوا، سرعت باد، شار گرمای ورودی به سیستم، شار ورودی آمونیوم، اکسیژن محلول، نیترات، جلبک، BOD (با تأخیر زمانی ۱ ماه برای جریان ورودی شاخه‌های اما و چاویز و تاخیر زمانی ۲ ماه برای شاخه گل‌گل و شاخه‌های فرعی ورودی به آن، به‌دلیل فاصله مکانی بیشتر نسبت به خروجی سد تأخیر زمانی بیشتری برای این داده‌ها درنظر گرفته شد) و میزان برداشت آب از مخزن، نسبت برداشت از آبگیر پایینی و تراز سطح آب با تأخیر زمانی دو ماهه (شکل ۲) تعریف شد. همچنین داده‌های

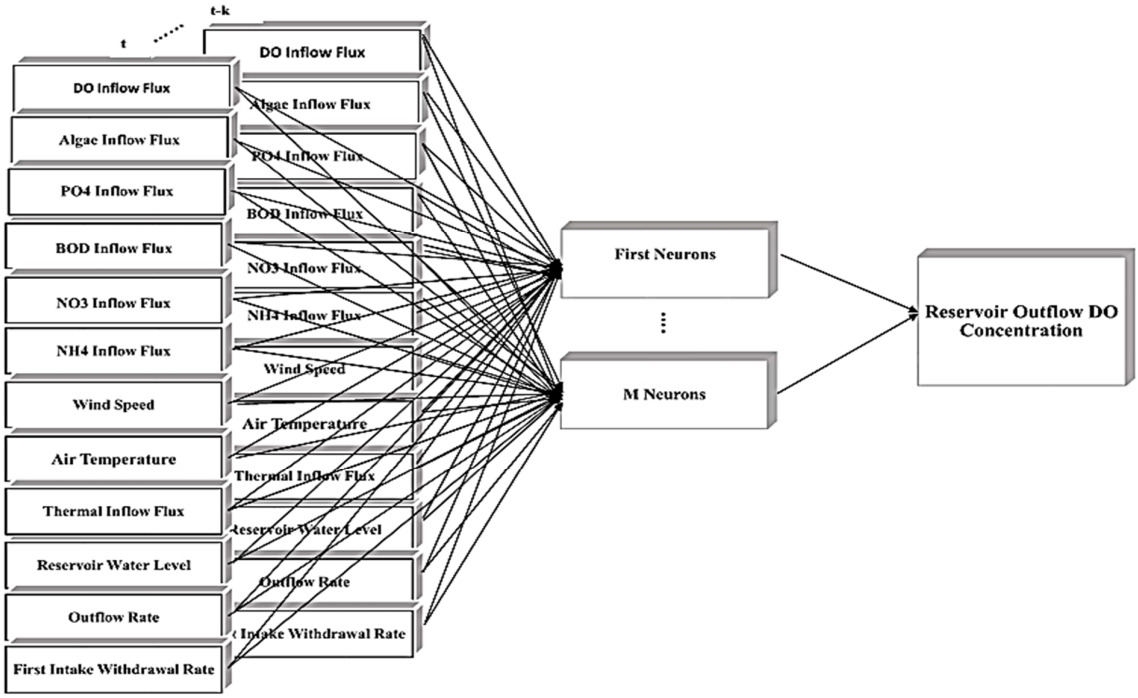


**Fig. 2.** The input data of surrogate model in dissolved oxygen concentration approximation in reservoir outflow

**شکل ۲**- ساختار داده‌های ورودی مدل داده کاوی تقریب غلظت اکسیژن محلول جریان خروجی از مخزن

ورودی به مدل داده‌کاوی تقریب آهن در نقطه خروجی سد، متوسط ۱۵روزه دمای هوا، سرعت باد، شار گرمای ورودی به سیستم، شار اکسیژن محلول، آهن، میزان برداشت آب از مخزن، نسبت برداشت از آبگیر پایینی و تراز سطح آب با تأخیر زمانی توضیح داده شده مشابه آنچه برای مدل داده کاوی تقریب اکسیژن محلول در نظر گرفته شدند، تعریف شدند. سایر پارامترهای کیفی مانند فسفات (شکل ۳) نیترات و BOD نیز در ساخت مدل جایگزین با توجه به معادلات و توابع کیفیت در مدل عددی CE-QUAL-W2 و تأخیرهای زمانی مبتنی بر پاسخ‌های هیدرودینامیک مخزن ایلام، مشابه آنچه برای اکسیژن محلول تشریح شد، تعیین شدند.

در این پژوهش ۲۶ سری متفاوت از سناریوهای بهره‌برداری از مخزن در ساختار برداشت انتخابی در بازه زمانی ۱۴ ساله توسط مدل CE-QUAL-W2 به‌عنوان داده‌های واقعی ایجاد شدند. سپس با استفاده از داده‌های تولید شده، مدل‌های داده کاوی ماشین بردار پشتیبان، برای تقریب پارامترهای کیفی اکسیژن محلول، نیترات، فسفات، آهن و BOD آموزش داده شده و سپس راستی آزمایی شدند. در این پژوهش، تقریب غلظت اکسیژن محلول، نیترات، فسفات، آهن و BOD توسط مدل‌های جایگزین توسعه داده شد و هر پارامتر کیفی در جریان خروجی مخزن در بازه‌های زمانی ۵ روزه توسعه یافت.

## ۲-۴- ساختار رویکرد پیشنهادی شبیه سازی-بهینه‌سازی مبتنی بر فرامدل؛ MOPSO-SVM

در این پژوهش، مدل داده‌کاوی ماشین بردار پشتیبان به‌عنوان مدل جایگزین CE-QUAL-W2 در تقریب پاسخ‌های کیفی مخزن به اعمال سیاست‌های بهره‌برداری در ساختار برداشت انتخابی و افزایش کارایی محاسباتی رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات چند هدفه در ارتباط با مدل‌های جایگزین، میزان خروجی و نسبت برداشت بهینه از آبگیرهای مخزن را با هدف دستیابی به مقادیر بهینه توابع هدف تعریف شده برای مسئله مورد نظر (معادلات ۶ و ۷)، تعیین می‌نماید. در پایان نیز، نتایج حاصل از به‌کارگیری روش فرامدل ترتیبی با مدل اصلی CE-QUAL-W2 ارزیابی شدند. ساختار رویکرد پیشنهادی در این بررسی در شکل ۴ ارائه شده است.

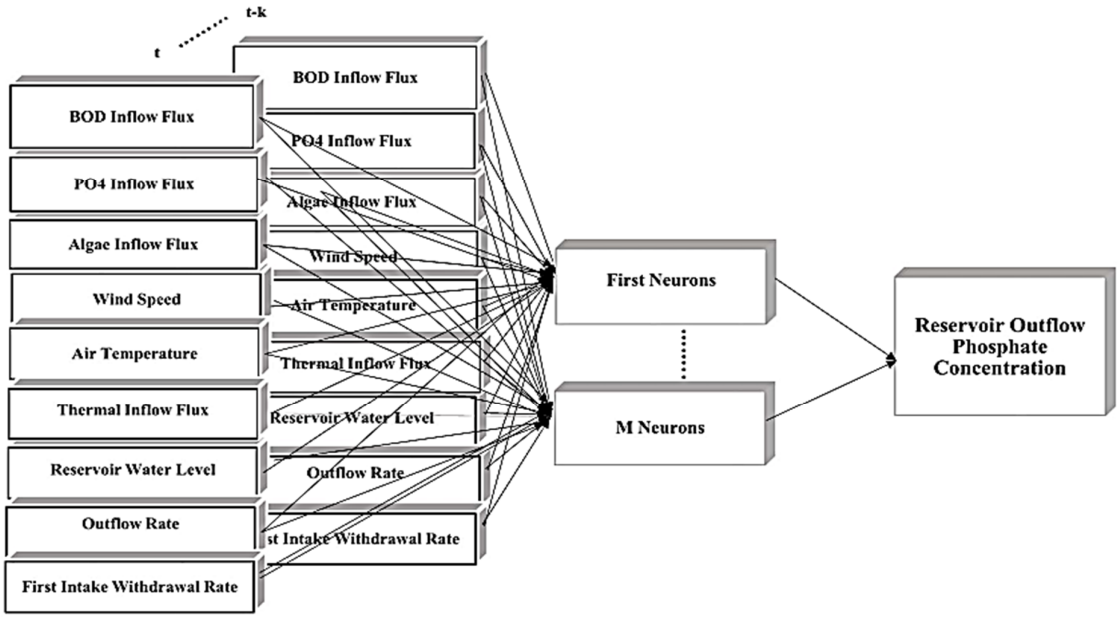


**Fig. 3.** The input data of surrogate model in phosphate concentration approximation in reservoir outflow

**شکل ۳**- ساختار داده‌های ورودی مدل داده کاوی تقریب غلظت فسفات جریان خروجی از مخزن

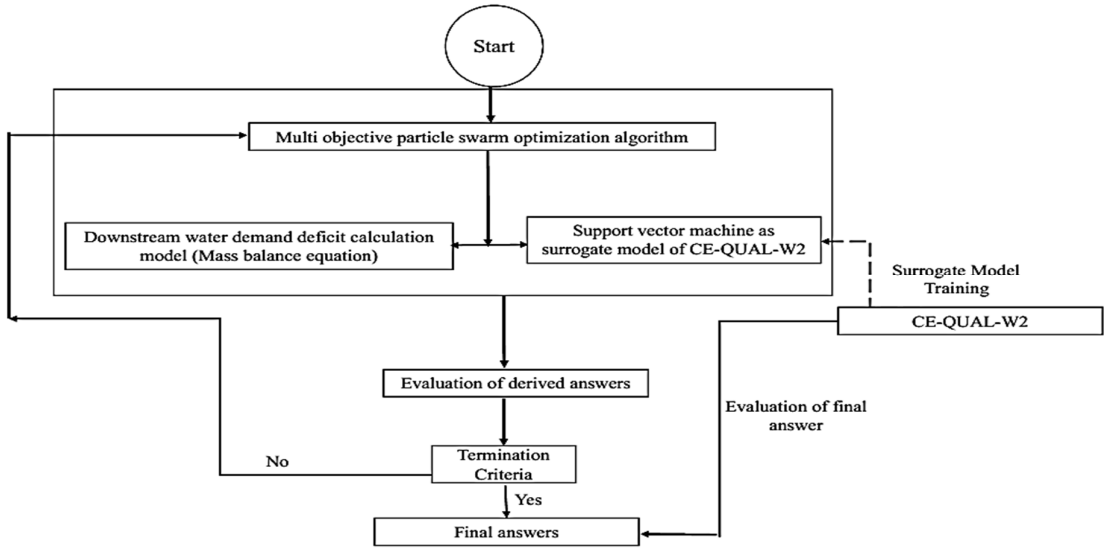


**Fig.4.** The diagram of the relationship between simulation, optimization and surrogate models in the proposed approach

**شکل ۴**- دیاگرام رابطه بین مدل‌های شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و مدل‌های جایگزین در رویکرد پیشنهادی

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- نتایج کالیبراسیون مدل شبیه‌ساز CE-QUAL-W2

کالیبراسیون کیفیت این مخزن بر اساس داده‌های سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۸۹ (استخراج شده از گزارش مطالعات شرکت مهاب قدس) انجام گرفت.

در شکل ۵ بعضی از نمودارهای کالیبراسیون مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2 آورده شده است.

### ۳-۲- توسعه مدل جایگزین در تقریب غلظت پارامترهای کیفی نیترات، فسفات، آهن، اکسیژن محلول و BOD

در شکل ۶ مقایسه شبیه‌سازی سری زمانی غلظت پارامترهای کیفی اکسیژن محلول و آهن مبتنی بر مدل جایگزین در محیط LIBSVM در مقایسه با داده‌های شبیه‌سازی توسط مدل CE-QUAL-W2 ارائه شده است. ضریب تعیین نتایج شبیه‌سازی حاصل از مدل CE-QUAL-W2 و نتایج شبیه‌سازی مدل‌های

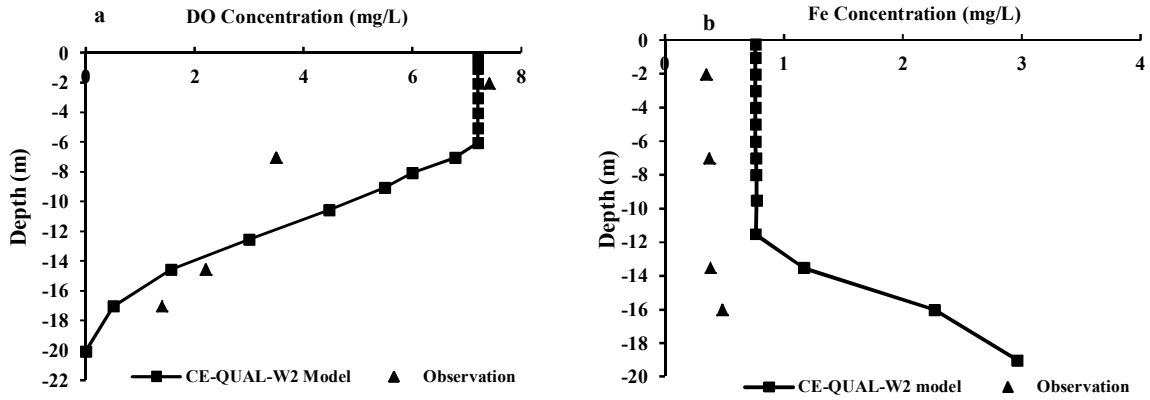


**Fig. 5.** Calibration results of water quality simulation model a) dissolved oxygen (August) b) Fe (September)

**شکل ۵**- نتایج کالیبراسیون غلظت پارامترهای کیفی a) اکسیژن محلول (شهریور ماه) b) آهن (مهر ماه)

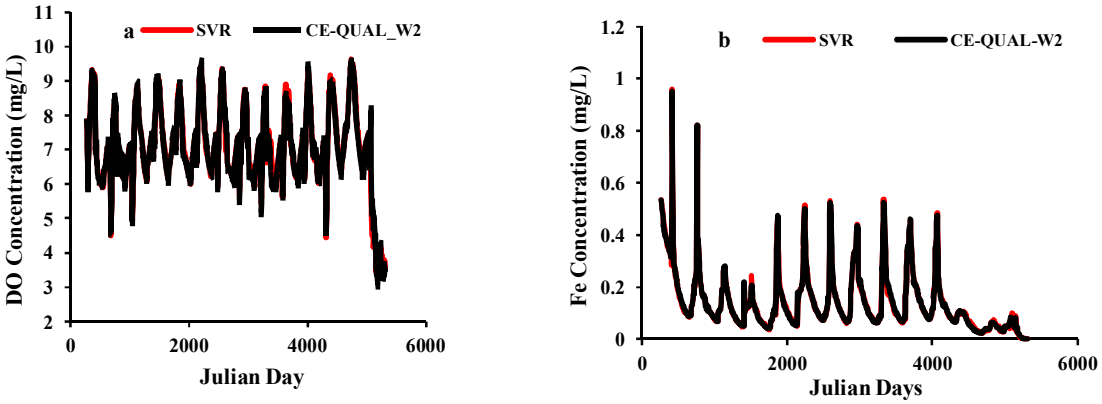


**Fig.6**. Comparison of the simulation results of reservoir outflow (a) DO and (b) Fe concentration in CE-QUAL-W2 with SVR as Water Quality Surrogate Model

**شکل ۶**- مقایسه شبیه‌سازی a) غلظت اکسیژن محلول و b) آهن توسط مدل‌های CE-QUAL-W2 با SVR به‌عنوان مدل جایگزین کیفیت

جایگزین تقریب پارامترهای کیفی نیترات، فسفات، آهن، اکسیژن محلول و BOD جریان خروجی از مخزن در بخش آزمون بیش از ۹۵ درصد بوده که بیانگر توانایی و کارایی مناسب مدل جایگزین توسعه داده شده در این پژوهش است. مدت زمان آموزش جایگزین برای هر یک از پارامترهای کیفی مورد بررسی ۵ دقیقه بود.

### ۳-۳-تعیین الگوی بهینه بهره‌برداری از مخزن در ساختار برداشت انتخابی با هدف بهبود شاخص کیفی جریان خروجی مخزن و تأمین نیازهای آبی پایین‌دست سیستم رودخانه-مخزن ایلام

در نتایج حاصل از حل مسئله تعیین الگوی بهینه بهره‌برداری از مخزن در ساختار برداشت انتخابی با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی مبتنی بر مدل جایگزین در سیستم رودخانه-مخزن ایلام ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده با کاهش کمبود نیاز آبی در پایین‌دست، شاخص کیفیت بهبود می‌یابد. افزایش رهاسازی جریان به پایین‌دست در فواصل زمانی متناسب با نیازهای پایین‌دست و منظم، سبب بهبود تأمین نیازهای پایین‌دست و همچنین بهبود شاخص کیفی شده است. به‌عبارتی با افزایش برداشت از مخزن، زمان ماند کاهش یافته و فرصت ته‌نشینی آلاینده‌ها و رخداد واکنش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی نیز کاهش و در نتیجه کیفیت جریان آب خروجی از مخزن بهبود می‌یابد. نتایج نهایی ارائه شده حاصل از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی مبتنی بر فرامدل در پایان توسط مدل CE-QUAL-W2 مورد ارزیابی قرار گرفت. ارتباط میان توابع هدف کمّی و کیفی گزینه‌های پیشنهادی به شرح شکل ۷ است. بر اساس نتایج، گزینه مثلثی شکل به‌عنوان جواب نامغلوب این مسئله ارائه شده است. پرداختن به سایر گزینه‌ها در صورتی که تابع هدف سومی مانند هزینه تصفیه/هزینه کاهش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی بالادست مورد توجه قرار گیرد، می‌تواند موضوعیت یابد. به این معنی که دستیابی به شرایط کیفی مطلوب‌تر، مستلزم صرف هزینه برای حذف عوامل آلاینده از طریق احداث/بهبود عملکرد تصفیه‌خانه یا کاهش ظرفیت تولید واحدهای صنعتی، مرغداری، دامپروری و کشاورزی بالادست خواهد بود که وارد نمودن هزینه‌های ناشی از این اقدامات به‌عنوان تابع هدف اقتصادی می‌تواند در کنار سایر اعضای مغلوب نمایش داده شده در شکل ۷، تکمیل کننده جبهه پرتو از یک مسئله بهینه‌سازی سه هدفه باشد. البته در حالت کاهش آلاینده‌های بالادست از طریق موارد اشاره شده اخیر، شاخص کیفیت نیز در شرایط بهتری قرار می‌گیرد. در مسئله‌ای با اهداف سه گانه تعریف شده، علاوه بر ایجاد زمان ماند کمتر در مخزن و افزایش تأمین نیاز آبی پایاب، صرف هزینه‌های اقتصادی برای حذف آلودگی در میزان بهبود شاخص کیفیت اثرگذار است.

مدت زمان اجرای هر سناریوی بهره‌برداری سیستم رودخانه-مخزن ایلام توسط مدل دو بعدی هیدرودینامیک و کیفیت آب CE-QUAL-W2، ۱۴ ساعت در سیستمی با مشخصات 4.00 Core i7-6700 CPU @ 4.00 GHz بود. به‌کارگیری مدل

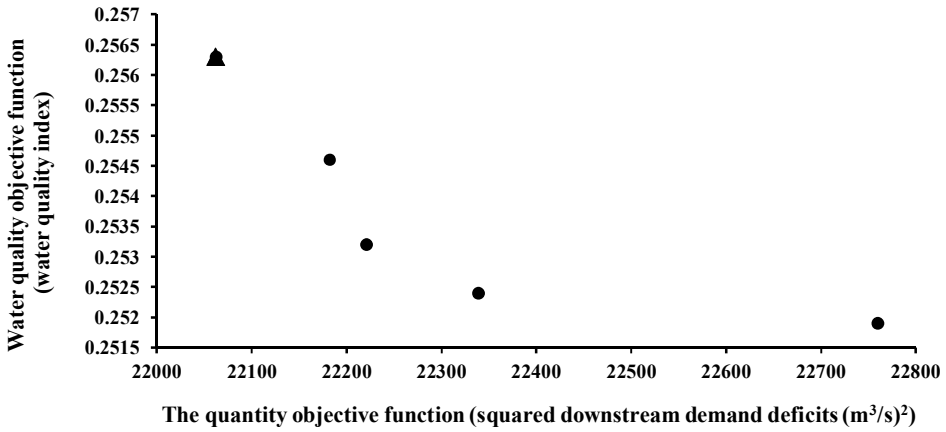


**Fig. 7.** The relationship between improving downstream water supply and enhancing reservoir outflow WQI

**شکل ۷**- روند تغییرات تأمین نیاز پایاب در مقایسه با بهبود شاخص کیفیت

عددی شبیه‌سازی هیدرودینامیک و کیفیت سیستم رودخانه-مخزن ایلام در ارتباط با الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات در قالب رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای حل این مسئله بزرگ مقیاس، مستلزم صرف هزینه‌های محاسباتی و زمانی گسترده است و عملاً حل مسئله با ابزارهای فوق را ناممکن می‌سازد. این در حالی است که رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی مبتنی بر فرامدل معرفی شده در این پژوهش، در طی ۸۰ ساعت، گزینه‌های بهینه را ارائه نمود که بیانگر دقت و کارایی قابل توجه این رویکرد در حل مسئله بزرگ مقیاس مورد بررسی این پژوهش است.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدیریت توأم کمیّت و کیفیت منابع آب مخزن در قالب برداشت انتخابی بررسی شد. رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مبتنی بر فرامدل در بهینه‌سازی میزان دبی خروجی و نسبت برداشت از آبگیرها، با هدف بهبود شاخص کیفیت جریان آب خروجی مخزن و کاهش کمبود نیازهای آبی پایین‌دست در حل این مسئله پیشنهاد شد. الگوریتم بهینه‌سازی دو هدفه هوش جمعی ذرات، مدل شبیه‌سازی عددی هیدرودینامیک و کیفیت آب CE-QUAL-W2 و ماشین‌بردار پشتیبان از ابزارهای مورد استفاده در این پژوهش بودند. بر اساس نتایج ارائه شده، روش پیشنهادی عملکرد نسبتاً موفقیت‌آمیزی در حل مسئله بزرگ مقیاس تعیین بهینه رهاسازی با در نظر اهداف توأم کمّی و کیفی و در قالب برداشت انتخابی داشته است. مدل‌های داده‌کاوی توسعه داده شده در تقریب پاسخ‌های کیفی جریان خروجی از مخزن ایلام متأثر از الگوهای مختلف بهره‌برداری در ساختار برداشت انتخابی، عملکرد بسیار مناسبی در مقایسه با مدل شبیه‌سازی عددی دو بعدی هیدرودینامیک و کیفیت آب CE-QUAL-W2 داشتند و اطلاعات مناسبی را برای الگوریتم بهینه‌سازی فراکاوشی توسعه داده شده در این پژوهش فراهم نمودند. بر اساس نتایج ارائه شده می‌توان گفت که نحوه بهره‌برداری در کیفیت آب رها شده از مخزن تأثیر بسزایی دارد. استفاده از ابزارهای ارائه شده در این بررسی در طراحی حجم مفید مخزن، محل قرارگیری دریچه‌ها و تخصیص بهینه بار آلاینده‌ها، در پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود.

## References

Amirkhani, M., Bozorg-Haddad, O., Fallah-Mehdipour, E. & Loáiciga, H. A. 2016. Multiobjective reservoir operation for water quality optimization. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering,* 142(12), 04016065. doi:10.1061/(ASCE) IR.1943-4774.0001105.

Castelletti, A., Yajima, H., Giuliani, M., Soncini-Sessa, R. & Weber, E. 2013. Planning the optimal operation of a multioutlet water reservoir with water quality and quantity targets. *Journal of Water Resources Planning and Management,* 140(4), 496-510.

Celeste, A. B. & Billib, M. 2009. Evaluation of stochastic reservoir operation optimization models. *Journal of Advances in Water Resources,* 32(9)**,** 1429-1443.

Chung, S.-W. & Gu, R. R. 2009. Prediction of the fate and transport processes of Atrazine in a reservoir. *Journal of Environmental Management,* 44(1)**,** 46-61.

Cole, T. M. & Wells, S. A. 2006. CE-QUAL-W2*: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, version 3.5*, Instruction Report EL-06-1, US Army Engineering and Resarch Development Center, Vicksburg, MS.

Javaheri, S. & Saadatpour, M. 2017. Deriving hydropower reservoir operation rules in selective withdrawal framework considering quality and quantity objectives; simulation-optimization approach based on meta-modelling. *Journal of Iran Water Resources Research,* 13(3)**,** 128-142. (In Persian)

Karamouz, M., Moridi, A. & Fayazi, H. 2008. Dealing with conflict over water quality and quantity allocation: a case study. *Journal of Scientia Iranica,* 15(1)**,** 34-49.

Kerachian, R. & Karamouz, M. 2007. A stochastic conflict resolution model for water quality management in reservoir–river systems. *Journal of Advances in Water Resources,* 30(4)**,** 866-882.

Kumar, D. & Reddy, M. 2007. Multipurpose reservoir operation using particle swarm optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management,* 133(3)**,** 192-201.

Ma, S., Kassinos, S. C., Fatta Kassinos, D. & Akylas, E. 2008. Effects of selective water withdrawal schemes on thermal stratification in Kouris Dam in Cyprus. *Journal of Lakes & Reservoirs: Research and Management,* 13(1)**,** 51-61.

Meraji, S. H., Afshar, M. H. & Afshar, A. 2005. Reservoir operation by particle swarm optimization algorithm. *Proceedings of the 7th International Conference of Civil Engineering (Icce7th)*, Tehran, Iran, 2005, 8-10.

MGCE. 2011. Long-Term Drinking Water Supply of Ilam City, (Mahab Ghodss Consulting Engineers), Tehran, Iran. (In Persian)

Narasimhan, B., Srinivasan, R., Bednarz, S., Ernst, M. & Allen, P. 2010. A comprehensive modeling approach for reservoir water quality assessment and management due to point and nonpoint source pollution. *Journal of Transactions of the ASABE,* 53(5)**,** 1605-1617.

Ostadrahimi, L., Mariño, M. A. & Afshar, A. 2012. Multi-reservoir operation rules: multi-swarm PSO-based optimization approach. *Journal of Water Resources Management,* 26(2)**,** 407-427.

Saadatpour, M. 2012. Deriving optimal reservoir operational strategy considering quality and quantity objective. PhD Thesis, Dept. of Civil Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. (In Persian)

Saadatpour, M. & Afshar, A. 2013. Multi objective simulation-optimization approach in pollution spill response management model in reservoirs. *Water Resources Management,* 27(6)**,** 1851-1865.

Saadatpour, M., Afshar, A. & Edinger, J. E. 2017. Meta-model assisted 2d hydrodynamic and thermal simulation model (CE-QUAL-W2) in deriving optimal reservoir operational strategy in selective withdrawal scheme. *Water Resources Management,* 31(9)**,** 2729-2744.

Soleimani, S., Bozorg-Haddad, O., Saadatpour, M. & Loáiciga, H. A. 2016. Optimal selective withdrawal rules using a coupled data mining model and genetic algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management,* 142(12)**,** 04016064. Doi: 10.1061/(ASCE) WR.1943-5452.0000717.

Suen, J.-P. & Wang, R.-H. 2010. Optimal reservoir operation considering downstream water quality and environmental flow needs. *World Environmental and Water Resources*, *Challenges of Change*, Providence, Rhode Island, United States, 2592-2601.

Swamee, P. K. & Tyagi, A. 2000. Describing water quality with aggregate index. *Journal of Environmental Engineering,* 126(5)**,** 451-455.

Vapnik, V. N. 1999. An overview of statistical learning theory. *Journal of IEEE Transactions on Neural Networks,* 10(5)**,** 988-999.