تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال سیزدهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۶
Volume 13, No. 3, Fall 2017 (IR-WRR)
۱۲۸-۱۴۲

استخراج قوانین بهره‌برداری از مخزن برقابی در ساختار برداشت انتخابی با در نظر گرفتن اهداف کمی و کیفی؛ رویکرد شبیه‌سازی- بهینه سازی مبتنی بر فرامدل

شیوا جواهری[۱] و مطهره سعادت پور[۲*]

چکیده

در این کار تحقیقاتی به منظور مدیریت توأم کمیت و کیفیت منابع آبی مخزن، از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مبتنی بر مدل جایگزین استفاده می‌گردد. رویکرد پیشنهادی با هدف غلبه بر مشکلات هزینه‌های محاسباتی و زمانی قابل توجه ناشی از مدل شبیه‌سازی عددی هیدرودینامیک و کیفیت آب CE-QUAL-W2 و فراخوانی‌های متعدد توسط الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات چند هدفه توسعه یافته است. مدل جایگزین پیشنهادی در این تحقیق از قابلیتهای مدل داده کاوی شبکه عصبی و توصیف مناسب اندرکنش‌های میان پاسخ‌های کیفی مخزن و شرایط هواشناسی، هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و کیفی بهره‌برداری می‌نماید. این رویکرد به منظور تعیین موقعیت بهینه آبگیرهای برداشت آب و نسبت برداشت از هر یک، در مخزنی با داده‌های واقعی در دوره هیدرولوژیکی ۱۵ ساله با اهداف بهبود شرایط کیفی اکسیژن محلول خروجی از مخزن و افزایش متوسط سالیانه درازمدت انرژی برقابی پیک بکار گرفته می‌شود. همچنین دستورالعمل بهینه بهره‌برداری از مخزن تنها در قالب برداشت انتخابی، با تعیین ضرایب مؤثر متغیرهای هواشناسی، هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و کیفی استخراج می‌گردد. مقایسه سری زمانی غلظت اکسیژن محلول جریان خروجی از مخزن در سناریوی بهینه طراحی و بهره‌برداری با سناریوی الگوی بهره‌برداری تاریخی، بیانگر عملکرد بسیار مطلوب رویکرد پیشنهادی در این تحقیق به منظور بهبود شرایط کیفی است.

کلمات کلیدی: الگوریتم هوش جمعی ذرات چند هدفه، اکسیژن محلول، انرژی برقابی پیک، بهره‌برداری از مخزن در ساختار برداشت انتخابی، دستورالعمل بهره‌برداری از مخزن، CE-QUAL-W2.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۸/۲۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۲/۶

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، کرج، البرز، ایران
۲- استادیار گروه آب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم وصنعت ایران
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان اسفند ۱۳۹۶ امکانپذیر است.

Deriving Hydropower Reservoir Operation Rules in Selective Withdrawal Framework Considering Quality and Quantity Objectives; Simulation-Optimization Approach Based on Meta-Modelling

*S. Javaheri [1] and M. Saadatpour[2]**

Abstract

In this research simulation-optimization (SO) approach based on surrogate model is applied in deriving reservoir operation strategies considering quality and quantity aspects. The proposed approach aims to overcome the computational and time burdens of CE-QUAL-W2 as a 2D numerical hydrodynamic and water quality simulation model with intensive inter-calls for multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) algorithm in SO approach. The proposed surrogate model in this study utilized the artificial neural network model's capabilities and suitable descriptions of interactions between reservoir water quality responses and meteorological, hydrological, hydraulic, and water quality conditions throughout the studied area. The developed approach in this research was applied in designing the optimum locations and optimum withdrawal rates from each intake of reservoir for a 15-year simulation period. Objectives were enhancing the dissolved oxygen in reservoir outflow as water quality index and increasing long term annual hydropower peak energy generation. Then the reservoir operation rules in selective withdrawal scheme were derived according to the correlation with meteorological, hydrological, hydraulic, and water quality data. The comparison between dissolved oxygen concentrations of reservoir outflow time series in optimum scenario with the historical operational scenario showed the suitable performance of proposed approach in enhancing downstream water quality condition through developing withdrawal rules considering quality and quantity objectives.

Keywords: Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm, Dissolved Oxygen, Peak Hydropower Energy, Reservoir Operation in Selective Withdrawal Framework, Reservoir Operation Rule, CE-QUAL-W2.

Received: November 18, 2016
Accepted: April 26, 2017

1-M.Sc. Graduate of Civil and Environmental Engineering, College of Environment, Karaj, Alborz, Iran
2-Assistant Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. Email; msaadatpour@iust.ac.ir
*- Corresponding Author

Archive of SID

www.SID.ir

۱- مقدمه

در طی دهه‌های اخیر رشد جمعیت، توسعه شهرنشینی و اقتصاد، توسعه فعالیت‌های کشاورزی، صنعت و توریسم و نیز تغییرات آب و هوایی سبب تنش فزاینده بر منابع آبی گردیده‌اند. فزونی فشار بر منابع آبی، ضرورت مدیریت مناسب منابع آب به عنوان یکی از سه عامل تشکیل و بقای محیط زیست (آب، خاک و هوا)، را بیش از پیش ضروری می‌نماید. امروزه بر همگان مشخص است که دسترسی به آب با کمیت و کیفیت مناسب، برای توسعه پایدار یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است. این در حالی است که مخازن آب سطحی بی‌شماری در مقیاس جهانی توسط گستره وسیعی از آلودگی‌ها همراه با کاربری اراضی مخرب و یا پروژه‌های توسعه منابع آبی تهدید می‌گردند (Bartram and Balance, 1995). ایجاد مخازن آب سطحی، اعتمادپذیری دسترسی به منابع آبی را افزایش می‌دهند، اما ذخیره‌سازی اغلب سبب تغییر در خصوصیات هیدرولوژیکی، دمائی و کیفیت منابع آبی رودخانه‌هایی که سد بر روی آنها ایجاد گردید، می‌گردند. بر این اساس، در سال‌های اخیر مطالعاتی به منظور کمی نمودن تأثیرات احداث مخازن سطحی بر دما و کیفیت پیکره آبی با هدف کاهش اثرات تخریبی زیست‌محیطی ذخیره‌سازی منابع آبی از طریق اقدامات سازه‌ای یا نحوه بهره‌برداری صورت گرفته است.

طراحی بهینه سازه‌های هیدرولیکی و نحوه بهره‌برداری از آنان از اقتصادی‌ترین رویکردها به منظور کاهش اثرات تخریبی زیست‌محیطی ایجاد انسداد در مسیر جریان آبی، خصوصا در کشورهای در حال توسعه، که پرداخت هزینه برای مباحث زیست‌محیطی بسیار گران جلوه می‌نماید، می‌باشند (Chaves and Kojiri, 2007). با همه مباحث مطرح شده، تاکنون کمتر به مباحث مدیریت کیفی منابع آب، حفاظت از کیفیت و اکوسیستم‌های آبی در طراحی و بهره‌برداری از این سازه‌های هیدرولیکی (سدها/مخازن آب سطحی) پرداخته شده‌است. بعبارتی روشن‌تر تاکنون، بیشتر مباحث اقتصادی (هزینه، سود و ...) و ایمنی نسبت به مباحث و اثرات زیست‌محیطی در طراحی و بهره‌برداری از این پیکره‌های آبی در اولویت توجه مدیران و برنامه‌ریزان قرار گرفته است. این در حالی است که مدیریت موفق منابع آب مستلزم درک درست از اجزای سیستم مورد مطالعه و توجه متوازن به مباحث اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی است.

در طی چند دهه اخیر، ارتباط تنگاتنگ کمیت و کیفیت منابع آبی در طراحی و بهره‌برداری از مخازن آبی مورد توجه قرار گرفته و تلاش‌هایی در جهت ایجاد مصالحه میان اهداف کمی و کیفی بهره‌برداری از منابع آبی و حرکت در جهت توسعه پایدار توسط محققین صورت پذیرفته است (Soltani et al., 2010; Karamouz et al., 2009; Shirangi et al., 2008; Gelda and Effler, 2007; Park et al., 2014; Xu et al., 2014; Marin et al., 2013; Teegavarapu et al., 2013; Saadatpour and Heravi, 2016).

Jaleh et al. (1998) با استفاده از رویکردهای سازه‌ای و غیرسازه‌ای، موقعیت بهینه آبگیرها، ظرفیت آنان و مقادیر برداشت آب از مخزن را به گونه‌ای بهینه (با استفاده الگوریتم ژنتیک چند هدفه و مدل ANFIS به عنوان مدل شبیه‌ساز کیفیت) نمودند تا مقادیر تجمیع نمک در مخزن و کیفیت آب خروجی ضمن تأمین مناسب نیازهای پائین دست بهبود یابد، بر اساس یافته‌های این محققین، ظرفیت آبگیرهای برداشت آب تأثیری بر کیفیت ندارد اما مقادیر و موقعیت برداشت آب بر کیفیت منابع آبی (شوری) تأثیرگذار خواهد بود. Campbell et al. (2002) به منظور ارزیابی سناریوهای تخصیص منابع آبی و تأمین نیازهای آبی رودخانه کِلامات از مدل پشتیبان تصمیم‌گیری SIAM با در نظر گرفتن معیارهای مرتبط با اهداف کشاورزی، برقابی، حیات گونه‌های در معرض خطر در رودخانه و مخازن در سطح حوضه استفاده نمودند. پارامترهای کیفی دما و اکسیژن محلول به عنوان پارامترهای کیفی موثر برحیات آبزیان در نظر گرفته شده بودند. تغییر در ترازهای هدف مخزن، منابع آب تخصیص یافته و مقدار رهاسازی جریان به پائین‌دست از جمله گزینه‌های تعریف سناریوهای مختلف بوده است. Stamou et al. (2007) از مدل شبیه‌سازی MERES به منظور تعیین تراز نرمال بهینه‌ای که قادر به حفظ شرایط کیفی (شرایط تغذیه‌گرائی) مطلوب در مخزن Plastiras است، استفاده نمودند. از میان سناریوهای تعریف شده ترازی به عنوان تراز بهینه انتخاب گردید که مخزن به لحاظ کیفی در شرایط نزدیک به شاداب طبقه‌بندی شده و قادر به تأمین درصد قابل اطمینانی از اهداف طرح باشد. Kerachian and Karamouz (2007) مدل غیرقطعی حل اختلاف را به منظور مدیریت کیفی و کمی در یک سیستم مخزن- رودخانه با هدف تأمین نیازهای کمی و رعایت پارامترهای کیفی (شوری) ارائه نمودند. متغیرهای تصمیم در مسأله مورد نظر، تعیین مقادیر رهاسازی جریان از هر یک از آبگیرهای مخزن و مقادیر حذف آلاینده‌های نقطه‌ای در پایین‌دست، بوده است. ابزارهای مورد استفاده آنان، مدل شبیه‌سازی کیفیت یک بعدی و نسخه اصلاح شده الگوریتم ژنتیک بوده است. Karamouz et al. (2008) مدل بهینه‌سازی نسخه توسعه یافته الگوریتم ژنتیک را با مدل شبیه‌سازی یک بعدی کیفیت آب مخزن WQRRS و مدل شبیه‌سازی کیفیت منابع آب رودخانه ارتباط دادند تا با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی برای بهینه‌سازی تابع چانه‌زنی نش مرتبط با ذینفعان مختلف در حوضه کرخه استفاده گردد.

Archive of SID
www.SID.ir

Yin et al. (2011) به منظور برقراری تعادل میان نیازهای اکوسیستم و نیازهای مصرفی آب مخزن تنقه در رودخانه تانگ چین از رویکرد ترکیب منحنی قوانین بهره‌برداری مخزن با سیاست رهاسازی حداقل جریان تنظیم شده از مخزن بهره گرفتند. الگوریتم ژنتیک انطباقی برای تعیین مقادیر بهینه متغیرها و پیدا کردن منحنی قوانین بهره برداری از مخزن با اهداف کاهش تغییرات هیدرولوژیکی پائین‌دست و بهبود محیط‌زیست انسانی و اکولوژیکی استفاده گردید. Ferreira and Teegavarapu (2012) به حل مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری کوتاه مدت یک سیستم برقآبی چند منظوره با در نظر گرفتن کیفیت آب پایین دست و افزایش تولید برق در شیوه‌ای یکپارچه با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها پرداختند. تکنیک برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح در ترکیب با الگوریتم‌های تکاملی و یک مدل شبیه‌سازی کیفیت مبتنی بر توازن جرم از ابزارهای مورد استفاده توسط آنان بوده است. Saadatpour (2012) طی مطالعات پژوهشی در رساله دکتری، با تمرکز بر اهداف کمی از قبیل کاهش کمبود نیازهای کشاورزی و زیست محیطی پایین دست کرخه و/ یا افزایش تولید انرژی برقآبی پیک به همراه اهداف کیفی مانند کاهش تخطی دمای آب خروجی از مخزن نسبت به دمای طبیعی رودخانه و/یا کاهش مجموع میزان تخطی غلظت اکسیژن محلول خروجی از مخزن، راهکاری مناسب برای بهره‌برداری بهینه از مخزن سد کرخه ارائه نمود. به دلیل وجود اهداف متفاوت و چندگانه در مدیریت کیفی و کمی منابع، توسعه و ارائه یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی چند هدفه، مورد نظر طرح وی بوده است. مدل عددی هیدرودینامیک و کیفیت آب CE-QUAL-W 2 به منظور شبیه‌سازی پارامترهای دمایی و تغذیه‌گرایی مخزن کرخه و الگوریتم هوش جمعی ذرات[1] چند هدفه به منظور بهینه‌سازی مسأله بزرگ مقیاس کیفیت آب، در کار پژوهشی وی مورد استفاده قرار گرفت. وی با توجه به بزرگ مقیاس بودن مسأله مورد بررسی و نیز حجم بالای محاسباتی مدل شبیه‌سازی عددی هیدرودینامیک و کیفیت آب، از تکنیکهای فرامدل ترتیبی و تطبیقی در تحقیق خود بهره جست. Saadatpour and Afshar (2013) به توسعه یک مدل مدیریتی برای مدیریت پاسخ مخزن به نشت ناگهانی آلودگی پایستار با استفاده از ارتباط دادن مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2 با الگوریتم چند هدفه هوش جمعی ذرات پرداختند. اهدافی مانند کاهش زمان پاکسازی مخزن، کاهش دفعات و بزرگی تخطی از استاندارد کیفیت آب در منابع آب رهاسازی شده به پایین‌دست، کاهش میزان افت تراز آب مخزن و کاهش میزان مصرف آب آلوده در مسأله آنان با بهینه نمودن جریان آب خروجی از مخزن دنبال گردید. Castelletti et al. (2013) به منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری مخزنی در ژاپن در قالب برداشت انتخابی در سری زمانی ۱۰ ساله و گام‌های ماهانه از مدل‌های شبیه‌سازی یک بعدی DYRESM-CAEDYM و مدول الگوریتم یادگیری تقویتی استفاده نمودند. کاهش اختلاف تراز سطح آب مخزن با تراز آب مطلوب، کاهش رشد جلبکی در مقیاس ساعتی، کاهش حجم خروجی رسوبات، کاهش کمبود نیاز آبی کشاورزی و کاهش اختلاف دمای آب خروجی مخزن با دمای طبیعی رودخانه از توابع هدف تعریف شده در مطالعات آنان بود. Hu et al. (2014) از یک مدل اکولوژیکی بهره‌برداری از مخزن با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه با رویکرد تطبیقی با اهداف ماکزیمم نمودن تولید انرژی برقابی، ظرفیت نگهداشت سیلاب و سود ناشی از فعالیتهای کشتیرانی و مینیمم نمودن خسارات ناشی از سیل در مدیریت کیفیت رودخانه‌ای در مجاورت مخازن سه گانه گُرجِس در چین استفاده نمودند. کیفیت آب رودخانه نیز به صورت قیدی در مسأله بهینه‌سازی آنان گنجانده و مدلی آماری برای تشریح ارتباط کیفیت منابع آب رودخانه با میزان بهره‌برداری از مخزن در کار تحقیقاتی آنان استفاده گردید. Aloui et al. (2015) به منظور مدیریت کیفیت آب مخزن سِجنان در تونس از مدل CE-QUAL-W2 و تکنیک برداشت انتخابی استفاده نمودند. به منظور بررسی نقش برداشت انتخابی و استخراج قوانین بهره‌برداری چهار سناریوی مختلف برداشت انتخابی تعریف گردید. بر اساس بررسی‌های انجام شده در این مخزن، برداشت از لایه‌های بالایی مخزن در ماههای سرد و برداشت از لایه‌های میانی و تحتانی مخزن در ماههای گرم سال (از ماه می تا اواخر نوامبر) سبب بهبود کیفیت مخزن می‌گردید. Soleimani et al. (2016) با استفاده از تکنیک فرامدل ترتیبی به طراحی موقعیت بهینه آبگیرهای برداشت آب در مخزن کرخه و نیز استخراج دستورالعمل بهره‌برداری از مخزن با هدف بهبود دمای آب خروجی نسبت به شرایط طبیعی (هدف زیست‌محیطی) پرداخت. به منظور حل مسأله از الگوریتم تک هدفه ژنتیک و ماشین بردار پشتیبان (LIBSVR) به عنوان ابزارهای بهینه‌سازی- شبیه‌سازی جایگزین استفاده نمود. Masoumi et al. (2016) با استفاده از رویکردهای پیشنهادی توسط Saadatpour (2012) به حل مسأله بزرگ مقیاس‌تری در غالب رودخانه- مخزن- رودخانه و مدیریت توأم نحوه بهره‌برداری از مخزن در ساختار برداشت انتخابی و تخصیص بهینه بار آلودگی فسفات امتداد رودخانه کرخه پرداخت. بهبود تأمین نیازهای کشاورزی و زیست‌محیطی پائین‌دست کرخه و بهبود غلظت BOD5، آمونیم، نیترات و فسفات نسبت به مقادیر استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست در نقاط کنترلی از اهداف کیفی مورد توجه او بوده است.

در این کار تحقیقاتی با فرض امکان طراحی موقعیت آبگیرهای برداشت آب در مخزن کرخه، به عنوان موردی مطالعاتی با داده‌های واقعی و همچنین لحاظ نمودن توأم اهداف کمی و کیفی، موقعیت بهینه آبگیرها به گونه‌ای تعیین گردید که حداکثر نمودن اهداف تأمین

Archive of SID
www.SID.ir

انرژی برقابی (هدف کمی) و کاهش تخطی از شرایط مطلوب کیفیت منابع آبی (هدف کیفی)، با در نظر گرفتن شاخص اکسیژن محلول، دنبال گردد. همچنین دستورالعمل نحوه بهره‌برداری از مخزن با رویکرد برداشت انتخابی و نیز در نظر گرفتن توأم اهداف کمی و کیفی استخراج گردید. طراحی موقعیت بهینه آبگیرهای مخزن با استفاده از مدل شبیه‌سازی عددی هیدرودینامیک و کیفیت آب در مخزنی بزرگ با رفتار دو بعدی و توسعه مدل جایگزین آن و نیز استخراج دستورالعمل بهره‌برداری از مخزن با در نظر گرفتن توأم اهداف کمی (تولید انرژی برقابی) و کیفی (بهبود شرایط تغذیه‌گرایی) مبتنی بر آمار درازمدت هیدرولوژیکی از نوآوری‌های مطالعه حاضر در مقایسه با تحقیقات قبلی می‌باشد.

۲- روش تحقیق

انجام عملیات مدیریتی به منظور تعیین بهره‌برداری ایده‌آل از مخازن با این هدف که ضمن دستیابی به اهداف کمی، از زوال و تخریب این منابع، جلوگیری نموده و یا میزان تخریب آن‌ها را کاهش بدهد، راهکاری مناسب، کارآمد و دارای منفعت اقتصادی- اجتماعی می‌باشد. استفاده از مدل‌های عددی شبیه‌سازی کیفیت منابع آبی پیکره‌های آبی در کنار الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی ابزارهای کارآمدی برای ارائه چنین برنامه‌های مدیریتی مناسب، می‌باشند. این در حالی است که نیاز به فراخوانی مدل‌های شبیه‌سازی عددی هیدرودینامیک و کیفیت آب توسط الگوریتم‌های تکاملی با صرف هزینه‌های محاسباتی و زمانی بالایی همراه است که به منظور غلبه بر این مشکل، استفاده از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با تکنیک مدل جایگزین (فرامدل) در بسیاری از متون علمی و مراجع رشته‌های مهندسی پیشنهاد گردیده‌است. در این کار تحقیقاتی، طراحی و استخراج دستورالعمل بهره‌برداری از مخزنی بزرگ مقیاس با لحاظ نمودن اهداف کمی و کیفی با استفاده از رویکرد پیشنهاد شده اخیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌ها، ابزارها و تکنیک‌های مورد استفاده برای حل مسأله مورد مطالعه در این بخش ارائه خواهند گردید.

۲-۱- رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی

ساخته شدن سیستم‌های بزرگ ذخیره آب و افزایش اینگونه پروژه‌ها به خصوص در کشورهای در حال توسعه به منظور بهره‌برداری از آب در دوره‌های طولانی‌تر به دلیل محدودیت کمی و کیفی منابع آبی، خطرات ناشی از آلودگی، پراکندگی این منابع در مناطق مختلف و همچنین توزیع غیریکنواخت مکانی و زمانی منابع، سبب تمرکز کارهای پژوهشی بر روی بهبود سیاست‌های بهره‌برداری و افزایش کارآیی این سازه‌ها در دهه‌های اخیر گردیده است (Labadie, 2004). رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی در حل مسأله تعریف شده در این پژوهش، بر ارائه چارچوبی به منظور تأمین توأم اهداف کمی و کیفی در طراحی و بهره‌برداری از مخزن آبی تاکید دارد.

۲-۱-۱- مدل بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات

در الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات، به عنوان یک تکنیک شناخته شده برای بهینه‌سازی مسائل پیچیده، در آغاز یک جمعیت تصادفی از ذرات تعریف می‌شود که هدف تعیین مقادیر مناسب این پارامترها می‌باشد. این ذرات دارای حافظه هستند یعنی بهترین موقعیتی را که هر ذره تا کنون اختیار کرده و بهترین موقعیتی را که همه ذرات تاکنون به صورت جمعی اختیار کرده‌اند، به خاطر می‌سپارند و مکان خود را در فضای جستجو با توجه به آنها و بر اساس معادلاتی تنظیم می‌کنند. مسئله مورد بررسی در این تحقیق یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه است که در این مسائل، چندین تابع هدف باید به صورت همزمان بهینه شوند. در این صورت مسأله دارای بیش از یک جواب بهینه بوده و باید مجموعه ای از راه حل‌ها را که هر یک از اهداف را در سطح قابل قبولی برآورده می‌سازند، به عنوان مجموعه جواب بهینه معرفی کرد که به آن‌ها جواب‌های بهینه پرتو گفته می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه هوش جمعی ذرات توسعه داده شده در این تحقیق، با توابع مرجع ZDT1 و ZDT2 مورد آزمون قرار گرفته و درستی عملکرد آنان مورد تائید قرار گرفت.

۲-۱-۲- مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2

مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2 به عنوان یکی از مطرح‌ترین مدل های شبیه‌سازی کیفیت منابع آب در طی دهه‌های اخیر در این مطالعه مورد استفاده قرار می‌گیرد. CE-QUAL-W2 یک مدل دو بعدی (طول و عمق) هیدرودینامیکی و کیفی آب می‌باشد که توانایی شبیه سازی رفتار کیفی سیستم در طول زمان، شبیه‌سازی تغییرات رفتار کیفی سیستم در طول و عمق پیکره‌های آبی، مدلسازی جامع پیکره‌آبی به دلیل در بر گرفتن روابط هیدرودینامیک، پیش‌بینی تراز سطح آب، سرعت و دما و روابط کیفی آب و قابلیت شبیه‌سازی پارامترهای کیفی ناشی از فرآیندهای مختلف تغذیه‌گرایی مانند نیترات، فسفات، جلبک، اکسیژن محلول، مواد آلی و رسوبات و ... را دارا می‌باشد. مدل مخزن با تعدادی المان‌های محاسباتی در طول و عمق شبکه‌بندی می‌گردد و معادلات هیدرودینامیکی و کیفی آب در هر یک از این المان‌ها که ارتباط بین آن‌ها از طریق فرآیندهای فرارفت، پخشیدگی و یا ته‌نشینی برقرار می‌گردد، حل می‌گردند. در اینکار تحقیقاتی از مدل شبیه‌سازی کالیبره و صحت‌سنجی شده CE-QUAL-W2 مخزن کرخه (Afshar and Saadatpour, 2009) استفاده گردید.

Archive of SID
www.SID.ir

۲-۲- مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مبتنی بر مدل جایگزین

مدل‌های جایگزین، مدل‌هایی به منظور تقریب رفتار سیستم‌های پیچیده چند متغیره، براساس مجموعه اطلاعات محدود حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی پرهزینه محاسباتی، با هدف تقریب پاسخ بخشی از یک سیستم هستند. در توسعه مدلهای جایگزین تعریف ارتباط درست بین متغیرهای تصمیم (در این مطالعه نسبت برداشت آب از آبگیرهای واقع در ترازهای مختلف مخزن) با متغیرهای حالت (غلظت اکسیژن محلول) سیستم بسیار حائز اهمیت است. مدل فرآیندی M (مدل مبتنی بر فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی که ترسیم کننده دقیقی از فرآیندهای طبیعی است)، را در نظر بگیرید. ارزیابی سناریوهای مختلف مدیریتی بر اساس بردار تصمیم‌گیری X بوده که منجر به ارائه خروجی Y می‌گردد یعنی Y=M(X) . تابع/توابع هدف در یک مسأله بهینه‌سازی را در نظر بگیرید:

$$OF = \{OF_1, OF_2, \ldots, OF_n\} \quad (۱)$$

که n تعداد توابع هدف است. مقادیر این توابع هدف با محاسبات مدل شبیه‌سازی M صورت می‌پذیرد بعبارتی

$$OF_k = f_k(M(X)) \quad (۲)$$

با توجه به پیچیدگی و حجم محاسباتی بالای مدل M، فرآیند بهینه‌سازی بسیار پر هزینه خواهد گردید. به منظور کاهش هزینه‌های محاسباتی، یکی از رویکردها استفاده از مدل جایگزین است که رفتار مدل M را تقلید می‌نماید. این مدل جایگزین دارای دقت پائین‌تری در شبیه‌سازی است اما دارای هزینه محاسباتی پائین‌تری بوده و رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی با سرعت بالاتری، اجرا می‌گردد. مدل جایگزین برای تقلید عملکرد کامل مدل M توسعه نمی‌یابد بلکه شبیه‌سازی متغیر/متغیرهای حالتی که بر تابع/توابع هدف تأثیرگذارند، با این تکنیک فرامدل صورت می‌پذیرد (Saadatpour, 2012).

۲-۲-۱- مدل شبکه عصبی (مدل جایگزین)

مدلهای داده کاوی دارای قابلیت ساخت مدل‌های تقریب، براساس تعداد زیادی از متغیرها می‌باشند. در اینکار تحقیقاتی از شبکه عصبی مصنوعی به عنوان یک تکنیک داده‌کاوی در توسعه یک مدل جایگزین کیفی استفاده گردید. تخمین پارامترهای شبکه عصبی (تعداد نرون‌ها، توابع آموزش، توابع یادگیری و ...) بسیار مهم است که در ازای سریهای مختلف ورودی و خروجی صورت می‌پذیرد. علاوه بر این، انتخاب درست داده‌های ورودی به شبکه عصبی در دقت تقریب این مدل بسیار حائز اهمیت است. انتخاب موفق داده‌های ورودی شبکه عصبی، مستلزم کسب دانش و آگاهی در خصوص فرآیندهای موثر بر سرنوشت و انتقال پارامتر کیفی مورد مطالعه، روابط علت و معلولی میان مولفه‌های کیفیت آب، ارتباط کیفیت و کمیت منابع آبی، دینامیک زمانی و مکانی پاسخ پیکره آبی، تأخیرهای آنها و عوامل موثر در این رویداد و ... است (Saadatpour, 2012).

۲-۲-۱-۱- تعیین داده‌های ورودی مدل شبکه عصبی مصنوعی برای مدلسازی اکسیژن محلول

برای توسعه مدل شبکه عصبی به عنوان جایگزینی از مدل دو بعدی هیدرودینامیک و کیفیت آب تشریح ساده‌ای از معادلات ریاضی بیان کننده سرنوشت پارامتر کیفی مورد مطالعه لازم است. اکسیژن یکی از عناصر مهم در اکوسیستم‌های آبی بوده و برای حیات ضروری است. با توجه به مفاهیم مربوط به مباحث پارامتر کیفی اکسیژن محلول و روابط حاکم بر میزان غلظت آن در پیکره‌های‌آبی (معادله ۳؛ Saadatpour, 2012) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

$$\begin{aligned} V\frac{\partial O}{\partial t} &= (AG(T, n_t, p_s, I) - k_{ra})V_a\gamma_{OM} \\ &+ A_{Surface}K_L(O_{sat} - O) \\ &+ K_{NO_3}(T)V_{ni}\gamma_{NH_4} - K_{POM}(T)V_{c_{POM}}\gamma_{OM} \\ &- K_{NH_4}V_{NH_4}\gamma_{NH_4} - \gamma_{OM}K_s(T)V_{Sed} \\ &- SOD(T)\times A_{Sed} \end{aligned} \quad (۳)$$

AG ضریب رشد جلبکی، p_s ضریب نیمه اشباع فسفر، n_t ضریب نیمه اشباع نیتروژن، I ضریب نیمه اشباع تابش نور خورشید، k_{ra} ضریب تنفس، V_a غلظت جلبک، $A_{Surface}$ سطح مقطع جریان، K_L ضریب هواگیری، O_{sat} غلظت اکسیژن محلول اشباع و O غلظت اکسیژن محلول، K_{NH4} ضریب نیتریفیکاسیون، K_{NO3} ضریب دی‌نیتریفیکاسیون، K_{POM} ضریب تجزیه مواد آلی، V_{ni} غلظت نیترات، V_{NH4} غلظت آمونیم، K_s ضریب تجزیه مواد آلی موجود در رسوبات، V_{Sed} غلظت رسوبات، SOD نیاز اکسیژن خواهی رسوبات، A_{Sed} سطح مقطع رسوبات است. γ_{OM} اکسیژن مورد نیاز برای تجزیه ماده آلی و γ_{NH4} مقدار اکسیژن مورد نیاز برای تجزیه ماده آمونیم می‌باشند. به دلیل تأثیرات دما (T) بر شرایط کیفی پیکره‌های آبی، درک فرآیندهای انتقال دما و مدلسازی آن به منظور فراهم نمودن شرایط مدلسازی پارامترهای کیفی یک ضرورت است. بر اساس رابطه توازن گرمایی در یک واحد حجم محدود و برای یک سیستم فرضی با اختلاط کامل خواهیم داشت (Chapra, 1997):

$$\rho C_p V\frac{dT}{dt} = Q_{in}\rho C_p T_{in}(t) - Q_{out}\rho C_p T(t) + A_s J \quad (۴)$$

در رابطه فوق، $T_{in}(t)$ دمای آب ورودی در زمان t، J شار گرمائی مبادله شده با اتمسفر در حجم کنترل، Q_{in} دبی جریان ورودی ، Q_{out} دبی جریان خروجی، ρ چگالی، C_p ظرفیت گرمائی ویژه آب، A_s سطح

Archive of SID

www.SID.ir

مقطع حجم کنترل می‌باشند. پارامترهای هواشناسی مانند دمای هوا، سرعت وزش باد و جهت آن، دمای شبنم و ... در میزان شار گرمائی مبادله شده تأثیرگذار هستند. به دلیل گستردگی مکانی پیکره‌های آبی، فرآیندهای متفاوت پخش و انتقال جرم و انرژی، نقش سرعت باد و جاذبه، شکل هندسی مخازن، موقعیت برداشت آب از مخازن و ...، در مخازن عمیق گرادیان حرارتی و کیفیت در جهت عمق مخزن وجود خواهد داشت. همچنین در مخازن طویل در اثر فرآیندهای موثر در انتقال و سرنوشت در مخزن، گرادیان طولی هیدرودینامیک و کیفیت در مخزن مشاهده می‌گردد. به همین دلیل، درجه حرارت و کیفیت آب خروجی با تأخیر نسبت به داده های ورودی به مخزن شکل خواهند گرفت (Saadatpour, 2012).

بر اساس روابط حاکم بر میزان غلظت اکسیژن محلول در پیکره‌های‌آبی، شار آمونیوم ورودی، نیترات، جامدات معلق، جلبک، نیاز اکسیژن خواهی بیولوژیکی، فسفات، اکسیژن محلول ورودی، شار گرمای ورودی، دمای هوا، سرعت وزش باد، میزان جریان خروجی، تراز سطح آب و درصد برداشت آب از لایه‌های مختلف مخزن (درصدهای برداشت آب از ۱۰ آبگیر تعریف شده برای مخزن کرخه) به عنوان داده‌های ورودی به مدل شبکه عصبی انتخاب گردیدند (شکل ۱). همچنین براساس بررسی‌های انجام شده رفتار مخزن کرخه در زمان t، از رویدادهای هواشناسی، هیدرولوژی، کیفی و سیاست‌های بهره‌برداری اعمال شده در مخزن در گام زمانی t-k متأثر می‌گردند. در نتیجه داده‌های ورودی به غیر از مقادیر برداشت آب از آبگیرهای طراحی، با در نظر گرفتن این تأخیر زمانی به سیستم وارد شدند. هر یک از داده‌های مربوط به شار پارامترهای کیفی و حرارت، اطلاعات هواشناسی و نیز مقادیر دبی خروجی از مخزن، تراز سطح آب مخزن، با متوسط مقداری ۱۵ روزه و با در نظر گرفتن تأخیر زمانی سه ماهه به مدل شبکه عصبی معرفی گردیدند. به این ترتیب هر یک از متغیرهای فوق دارای ۶ مقدار عددی برای هر بازه زمانی هستند.

در این تحقیق تقریب غلظت اکسیژن محلول در هر ۱۰ روز صورت می‌پذیرد. در این مطالعه برای آموزش مدل از نتایج مدل شبیه‌سازی عددی هیدرودینامیک و کیفیت آب CE-QUAL-W2 استفاده گردید. ۲۰ سناریوی مختلف بهره‌برداری با رویکرد برداشت انتخابی در طول ۱۵ سال شبیه‌سازی اجرا گردید. نتایج ۱۶ اجرا به عنوان داده‌های آموزشی و نتایج ۴ اجرای دیگر به عنوان داده‌های آزمون به مدل شبکه عصبی معرفی گردیدند.

۲-۳- توابع هدف تعریف شده در مسأله مورد بررسی

در این مطالعه دو تابع هدف کمی و کیفی در نظر گرفته شد. تابع هدف کیفی مسأله با در نظر گرفتن اکسیژن محلول به عنوان شاخص کیفی، به صورت مینیمم نمودن مجموع مربع تخطی غلظت اکسیژن محلول خروجی مخزن نسبت به مقدار استاندارد در طول روزهای شبیه‌سازی در فواصل زمانی ۱۰ روز تعریف می‌گردد.

$$\text{Min} \quad f_{quality} = \sum_{i=1}^{TotalSimulationContolDay} (DO_{standard} - DOConcentration_i)^2 \qquad (۵)$$

$$DOConcentration = \begin{cases} DO_{standard} & DOConcentration \geq DO_{standard} \\ DOConcentration & else \end{cases} \qquad (۶)$$

در رابطه فوق $DO_{standard}$ و $DOConcentration_i$ به ترتیب غلظت استاندارد اکسیژن محلول (۵ میلیگرم در لیتر) و غلظت اکسیژن محلول جریان خروجی مخزن در بازه زمانی iام است. ماکزیمم کردن متوسط سالانه دراز مدت انرژی پیک به عنوان تابع هدف کمی در این مطالعه مورد نظر است. برای محاسبه انرژی پیک در ابتدا دبی طراحی نیروگاه، دبی ماکزیمم و مینیمم مجاز عبوری از نیروگاه، نیاز برقابی نیروگاه، هد خالص، مینیمم و ماکزیمم مجاز هد طراحی به کمک روابط مشخص با توجه به مشخصات نیروگاه محاسبه می‌گردند.

$$DesignFlow = (IC \times 1000 / (9.81 \times Eff \times DesignHead)) \qquad (۷)$$

$$Q_{in} = Outflow_t \times (Y_{1_t} + Y_{2_t} + Y_{3_t} + Y_{4_t} + Y_{5_t} + Y_{6_t} + Y_{7_t}) \qquad (۸)$$

در این معادلات DesignFlow دبی طراحی، Q_{in} دبی قابل دسترسی توسط نیروگاه، $Outflow_t$ حجم جریان خروجی از مخزن کرخه در بازه زمانی t و Yi_t درصد برداشت از آبگیر i در بازه زمانی t هستند.

IC ظرفیت نصب نیروگاه، Eff میزان کارایی نیروگاه و DesignHead هد طراحی می‌باشند. در معادله زیر نیز، $plantInflow_t$ میزان دبی ورودی به نیروگاه در گام زمانی tام (بر اساس مقادیر دبی قابل استفاده، ماکزیمم و مینیمم دبی طراحی محاسبه می‌گردد)، $NetHead_t$ هد خالص در زمان t و peaktime ساعات عملکرد پیک نیروگاه است. میزان متوسط انرژی پیک سالانه (Energy) در این تحقیق بر اساس معادله ۹ محاسبه گردید.

$$Energy = ((\sum_{t=1}^{TotalContolDay} 9.81 \times plantInflow_t \times NetHead_t \times Eff \times peaktime \times 10/1000000)/5310) \times 365) \qquad (۹)$$

Archive of SID
www.SID.ir

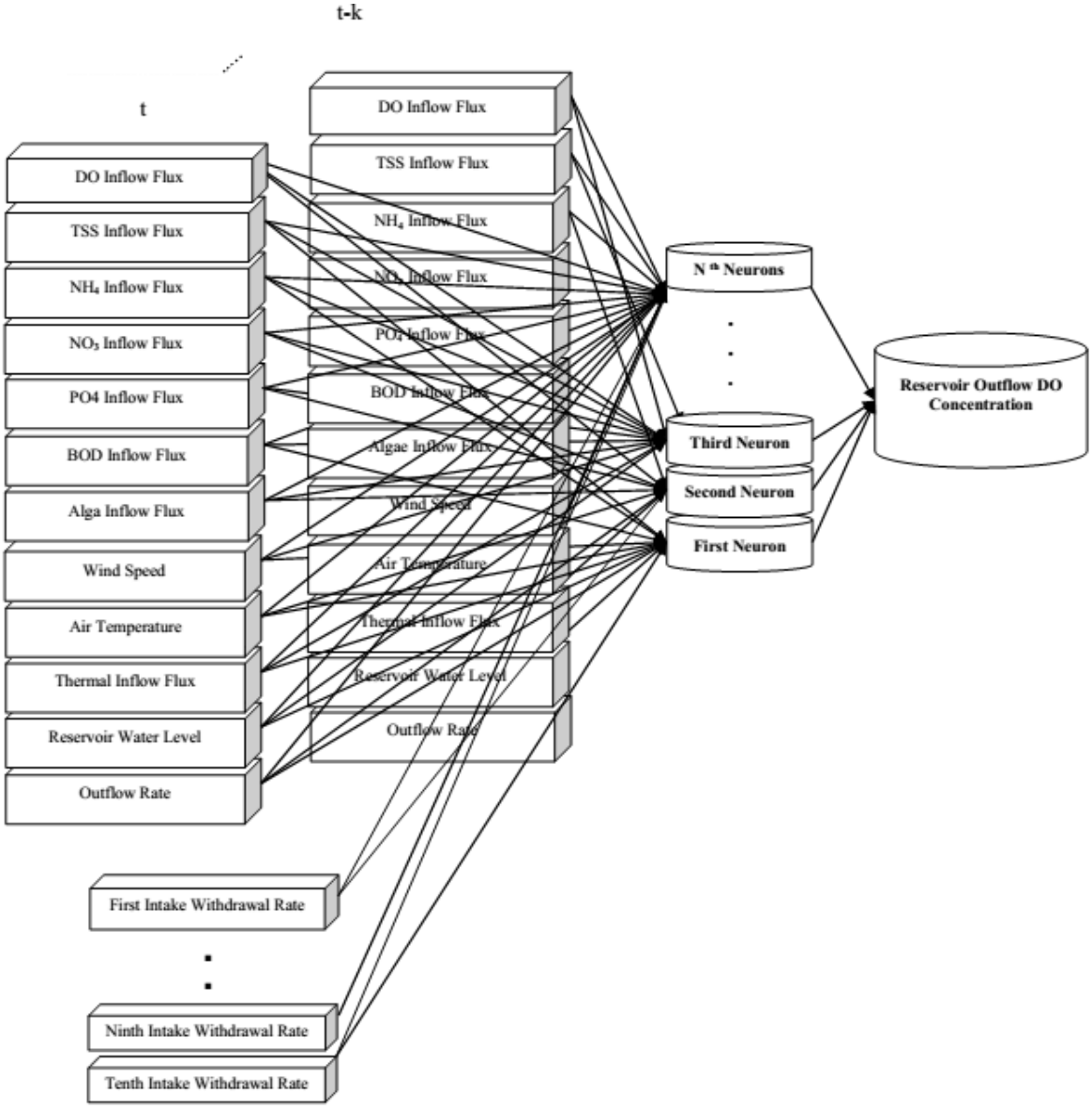

Fig. 1- Input data in neural network model of dissolved oxygen in reservoir outflow

شکل ۱- داده‌های ورودی مدل شبکه عصبی اکسیژن محلول دبی خروجی مخزن

۲-۴- ساختار مسائل حل شده در این تحقیق

در این کار مطالعاتی مدل داده‌کاوی شبکه عصبی مصنوعی به عنوان مدل جایگزین از CE-QUAL-W2 در تقریب پاسخ‌های کیفی مخزن به اعمال سیاست‌های برداشت انتخابی بهره‌برداری مخزن و افزایش کارایی محاسباتی رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات چند هدفه در ارتباط با مدل جایگزین، موقعیت و درصد برداشت بهینه از آبگیرهای مخزن را با هدف دستیابی به مقادیر بهینه توابع هدف تعریف شده برای مسأله مورد نظر، تعیین می‌نماید. در پایان نیز، نتایج حاصل از بکارگیری تکنیک فرامدل ترتیبی با مدل اصلی CE-QUAL-W2 ارزیابی می‌گردد. توسعه هر دو مدل شبیه‌سازی جایگزین و الگوریتم بهینه‌سازی با برنامه‌نویسی در محیط متلب صورت پذیرفته است. تشریح مسائل حل شده در این مطالعه در بخشهای زیرین ارائه می‌گردد. موقعیت و تراز برداشت آب از هر یک از آبگیرها (۱۰ ردیف نخست قابل طراحی هستند و ۲ ردیف آخر موقعیت‌های کنونی آبگیر در مخزن است) در جدول ۱ ارائه شده است. دیاگرام رابطه میان مدلهای شبیه‌سازی- بهینه‌سازی- فرامدل در مسائل حل شده این تحقیق، برای نشان دادن مراحل کلی تحقیق در شکل ۲ نمایش داده شده است.

www.SID.ir

۲-۴-۱- ساختار مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی MOPSO-ANN در مسأله ۱

در این مطالعه، ابتدا مدل داده‌کاوی براساس اطلاعات ورودی تعیین شده مطابق با بخش ۲-۲-۱-۱ و اطلاعات حاصل از مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2 مخزن کرخه، آموزش داده شده و سپس مورد آزمون قرار می‌گیرد. ساختارهای متفاوت تعداد نرون‌ها، الگوریتم‌های آموزش و یادگیری و ... در توسعه شبکه عصبی مورد آنالیز حساسیت قرار می‌گیرد و در ادامه شبکه عصبی با ساختاری که کمترین خطای میانگین را دارا می‌باشد، به عنوان مدل شبیه‌سازی مخزن جایگزین CE-QUAL-W2 انتخاب می‌گردد. در ادامه این مدل جایگزین همراه با مدول محاسبه انرژی برقابی با الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه هوش جمعی ذرات ارتباط داده می‌شود. متغیرهای تصمیم مسأله مورد بررسی تعیین موقعیت بهینه برداشت آب و درصد برداشت از هر آبگیر انتخابی در مخزن کرخه هستند. متغیرهای تصمیم در این مسأله مـــی‌باید به‌گونه‌ای تعیین گردند که علاوه بر امکان برداشت از آبگیر واقع در تراز ۱۶۲، حداکثر از ۴ آبگیر از میان ۹ آبگیر باقیمانده انتخاب شوند. پس از ساخته شدن و اصلاح متغیرهای تصمیم، این متغیرهای تصمیم به همراه دیگر اطلاعات هواشناسی و هیدرولوژیکی و کیفی در مدل شبکه عصبی (مدل جایگزین)، وارد و سپس شبیه‌سازی غلظت اکسیژن محلول جریان خروجی انجام می‌گردد. در این تحقیق فرض گردید، امکان ارسال آب برای نیروگاه تنها برای آبگیرهای واقع در تراز بیش از ۱۸۱ میسر است. توابع هدف کمی و کیفی محاسبه شده پس از هر بار اجراء، معیار تعیین شایستگی ذرات تولید شده توسط الگوریتم هوش جمعی ذرات بوده و با تکرار این الگوریتم در گامهای مختلف، جواب‌های بهینه مسأله به‌دست می‌آیند.

۲-۴-۲- ساختار مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی MOPSO-ANN در مسأله ۲

به منظور فراهم نمودن دستورالعمل بهره برداری از مخزن سد در شرایط مختلف هواشناسی، هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و کیفی، مقادیر برداشت از آبگیرها در طول مدت ۱۵ سال شبیه‌سازی به وسیله ضرایبی به پارامترهای تأثیرگذار بر شرایط مخزن از جمله پارامترهای هواشناسی، هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و کیفی تعریف شده به عنوان داده‌های موثر بر توابع هدف کمی و کیفی وابسته گردیدند.

به منظور استخراج دستورالعمل بهره‌برداری از مخزن یکی از اعضای جبهه پرتوی جوابهای بهینه مسأله یک، انتخاب گردید. عضو انتخاب شده، معرف درصدهای برداشت از ۵ آبگیر مشخص انتخاب شده به عنوان یک راه‌حل بهینه در مسأله بهینه‌سازی طراحی در تعیین موقعیت و مقادیر بهینه برداشت آب از مخزن سد کرخه می‌باشد.

با توجه به بازه‌ها و واحدهای متفاوت هر یک از داده‌های ورودی، کلیه پارامترها (۱۲ پارامتر هواشناسی، هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و کیفی؛ دمای هوا، سرعت وزش باد، شار گرمایی، شار آمونیم، نیترات، فسفات، اکسیژن محلول، جلبک، ذرات معلق، BOD ورودی به مخزن، تراز سطح آب مخزن، مقدار رهاسازی از مخزن) نرمالایز گردیدند. در مدل شبکه عصبی که به عنوان مدلی جایگزین شبیه‌سازی کیفیت در مخزن کرخه تعریف شده، داده‌های ورودی در بردارنده شرایط هواشناسی، هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، کیفی (۱۲ پارامتر) به صورت میانگین ۱۵ روزه با تأخیر زمانی ۹۰ روز (۶ داده برای هر پارامتر) به مدل وارد می‌گردند (۷۲=۱۲×۳×۲).

Table 1- Intake elevations and locations corresponding to computational layers of CE-QUAL-W2 model

جدول ۱- رقوم ارتفاعی و موقعیت آبگیرها در لایه‌های محاسباتی مدل CE-QUAL-W2

Intake Number	Intake type	Intake Elevation	Intake top layer number	Intake bottom layer number
1	Point	212	7	9
2	Point	206	10	12
3	Point	200	13	15
4	Point	196	15	17
5	Point	192	17	19
6	Point	188	19	21
7	Point	182	22	24
8	Point	176	25	27
9	Point	170	28	30
10	Point	162	32	34
Main 1	Point	180	23	25
Main 2	Point	161.5	32	34

Archive of SID
www.SID.ir

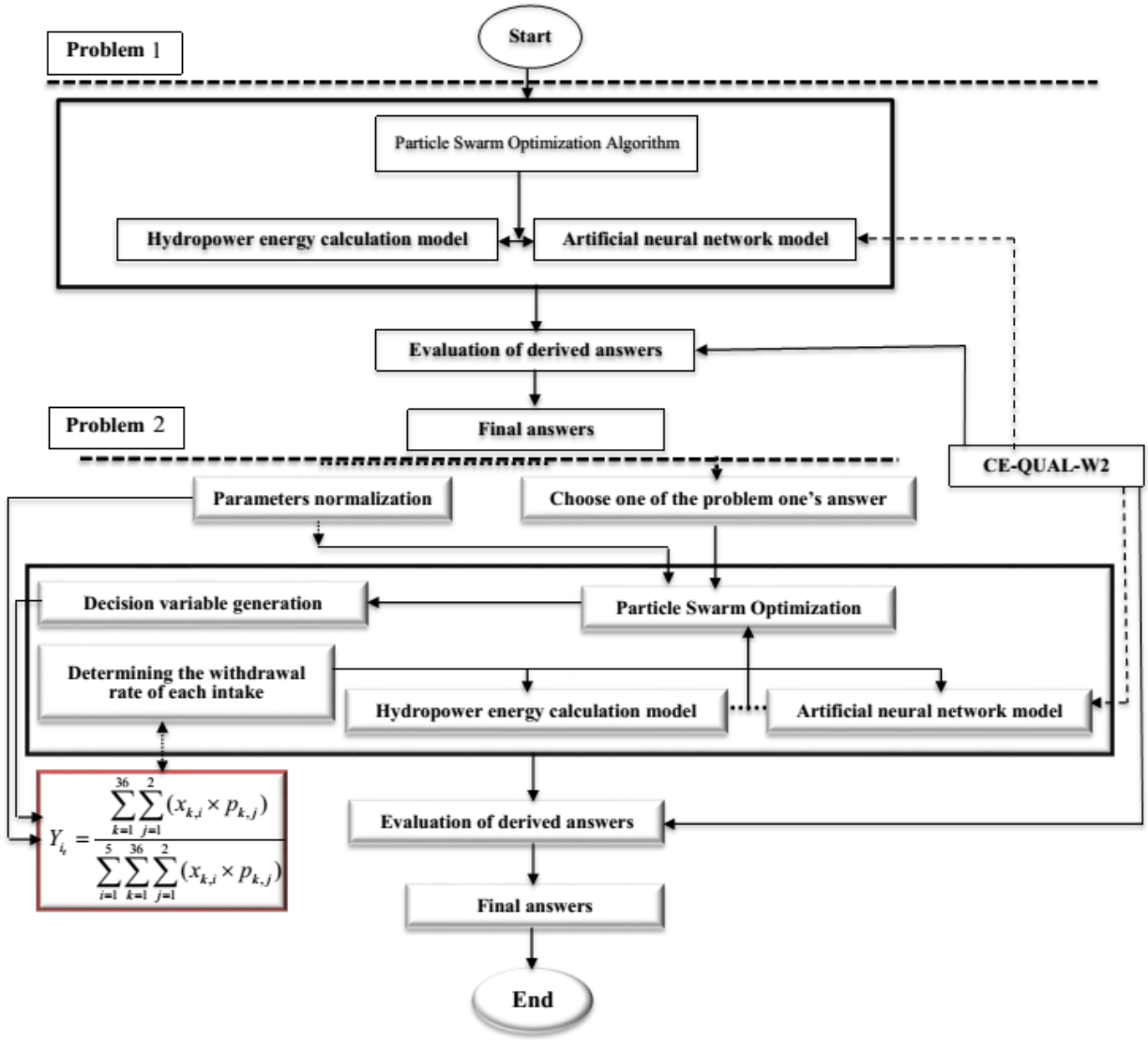

Fig. 2- Diagram of relation between simulation, optimization, and surrogate models in current research

شکل ۲- دیاگرام رابطه بین مدلهای شبیه‌سازی- بهینه‌سازی- مدل جایگزین تحقیق حاضر

۱۰ موقعیت آبگیری که حداکثر ۵ عضو آن دارای مقادیر بزرگتر از صفر هستند (این مقادیر معرف درصدهای برداشت از هر آبگیر هستند)، در تعیین غلظت اکسیژن دارای نقش می‌باشند. در استخراج دستورالعمل بهره‌برداری با رویکرد برداشت انتخابی، مقادیر این درصدهای برداشت از هر یک از ۵ آبگیر با موقعیت مشخص به ۷۲ داده ورودی مرور شده اخیر، در هر ماه برای هر دریچه جداگانه با ضرایبی ارتباط داده شدند. در نتیجه برای تعیین مقادیر برداشت از هر دریچه، ۳۶ متغیر تصمیم (۳×۱۲) به منظور استخراج دستورالعمل بهره‌برداری می‌باید تعیین گردد و در مجموع برای ۵ دریچه، ۵×۳۶ متغیر تصمیم در حل مسأله خواهیم داشت. پس از ضرب متغیرهای تصمیم در هریک از ۷۲ داده‌های ورودی نرمالایز شده، سهم برداشت از هر آبگیر مطابق معادله ۱۰ بدست آمد.

$$Y_{i_t} = \frac{\sum_{k=1}^{36}\sum_{j=1}^{2}(x_{k,i} \times p_{k,j})}{\sum_{i=1}^{5}\sum_{k=1}^{36}\sum_{j=1}^{2}(x_{k,i} \times p_{k,j})} \qquad (۱۰)$$

در این معادله $x_{k,i}$ ضریب تعیین شده به عنوان متغیر تصمیم برای متغیر $p_{k,j}$ (به دلیل اینکه برای هر متغیر k در هر ماه ۲ داده (j=1,2) وجود دارد) و برای دریچه i ام می‌باشد. در ادامه با استفاده از مقادیر برداشت بدست آمده برای هر آبگیر در هر روز (معادله ۱۰) و ۷۲ داده هواشناسی، هیدرولوژی، کیفی، مقادیر رهاسازی جریان از مخزن و تراز سطح آب مخزن، میزان غلظت اکسیژن محلول خروجی از مخزن با استفاده از مدل داده کاوی تقریب زده می‌شود. این مدل‌های شبیه‌سازی جایگزین در ارتباط با الگوریتم هوش جمعی ذرات چند

www.SID.ir

هدفه و مدول محاسبه انرژی برقابی، در تعداد تکرار معین مقادیر بهینه این ضرایب را که در بردارنده دستورالعمل بهینه بهره‌برداری هستند تعیین می‌نماید.

۲-۵- مورد مطالعاتی

رویکرد پیشنهادی در اینکار تحقیقاتی برای مورد مطالعاتی فرضی اما با داده‌های واقعی، مخزن کرخه، مورد استفاده قرار گرفت. سد کرخه بر روی رودخانه کرخه و در ۲۲ کیلومتری شمال غربی شهرستان اندیمشک در استان خوزستان ساخته شده‌است. کرخه با تاجی به طول ۳۰۳۰ متر و ارتفاع ۱۱۷ متر از لحاظ حجم بدنه بزرگترین سد تاریخ ایران است و دارای حجم ۵۳۴۶/۸ میلیون مترمکعب در تراز نرمال بهره برداری، ۲۲۰ متر ارتفاع از سطح دریا، و ۴۳۰ میلیون مترمکعب در حداقل تراز بهره برداری، ۱۶۰ متر ارتفاع از سطح دریا، می‌باشد. مساحت دریاچه در تراز بهره برداری ۲۲۰ متر ۱۶۲,۴۷ کیلومتر مربع و طول آن حدودا ۶۰ کیلومتر می باشد. تأمین و تنظیم آب جهت آبیاری ۳۲۰ هزار هکتار از أراضی پایین دست، تولید انرژی برقابی به میزان ۹۳۴ گیگاوات ساعت در سال و کنترل سیلهای مخرب رودخانه و جلوگیری از خسارات ناشی از آن از اهداف اجرای این پروژه بزرگ می‌باشد.

۳- بکارگیری رویکرد پیشنهادی در این تحقیق در مسأله‌ای با داده‌های کافی؛ نتایج و تفسیر آن

مدل داده‌کاوی شبکه عصبی (مدل جایگزین) بر اساس اطلاعات حاصل از مدل CE-QUAL-W2 و داده‌های ورودی تعریف شده برای مسأله مورد بررسی در این تحقیق، آموزش و صحت‌سنجی گردید. سپس مدل بهینه‌سازی با رویکرد استفاده از مدل شبیه‌سازی جایگزین برای تعیین مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم در مسائل مورد استفاده قرار گرفت. در پایان تابع هدف کیفی اعضای جبهه پرتو تعیین شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی، توسط مدل فرآیندی CE-QUAL-W2 مورد ارزیابی قرار گرفته و اعضای جبهه پرتو، مجددا بازنگری گردیدند.

۳-۱- توسعه مدل جایگزین در تقریب غلظت اکسیژن محلول

با توجه به ماهیت مسأله تعریف شده در این کار تحقیقاتی که تعیین موقعیت آبگیر و میزان بهینه برداشت از آن، مورد نظر است، ۲۰ الگوی مختلف بهره‌برداری از مخزن تنها با رویکرد برداشت انتخابی به صورت تصادفی برای مدل CE-QUAL-W2 تعریف گردید. خروجی غلظت اکسیژن محلول شبیه‌سازی شده توسط مدل CE-QUAL-W2 به عنوان خروجی مورد نظر از مدل داده کاوی است.

آنالیز حساسیت بر روی توابع آموزشی، توابع یادگیری و تعداد نرون‌ها به منظور انتخاب بهترین شبکه عصبی با کمترین خطای متوسط صورت گرفت. به این منظور تعداد نرون‌های شبکه عصبی بین ۴۰ تا ۵۰ تغییر یافت. با بررسی میزان خطای متوسط، شبکه عصبی با تعداد ۴۴ نرون در لایه پنهان با تابع آموزشی trainlm و تابع یادگیری learnk به عنوان بهترین گزینه‌های آموزش و یادگیری شبکه انتخاب گردید. در شکل ۳ سری زمانی غلظت اکسیژن محلول شبیه‌سازی در مدل شبکه عصبی در مقایسه با مدل عددی دو بعدی هیدرودینامیک و کیفیت آب برای یک سری از داده‌های آزمون نمایش داده شده است. ضریب همبستگی میان داده‌های آزمون و نتایج شبیه‌سازی اکسیژن محلول در داده‌های آزمون بیش از ۹۸٪ است.

۳-۲- مسأله ۱

حداقل نمودن مجموع مجذور تخطی غلظت اکسیژن محلول خروجی از مخزن سد نسبت به شرایط استاندارد (۵ میلی‌گرم در لیتر) در بازه‌های زمانی ۱۰ روزه در طی شبیه‌سازی ۱۵ ساله و حداکثر کردن میزان متوسط سالیانه انرژی برقآبی پیک از اهداف مورد بررسی در این مسأله بوده است. جبهه پرتو تعیین شده برای دوره شبیه‌سازی ۱۵ ساله با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی با ۱۰۰۰ تکرار و ۱۰۰ ذره، در شکل ۴ ارائه شده است. زمان اجرای این برنامه در ساختار ANN-MOPSO در کامپیوتری با مشخصات CPU@2.26GHz Core i5-430M، ۲ ساعت و زمان آموزش شبکه عصبی حدود ۲۰ ساعت بوده است (مجموعا ۲۲ ساعت). در صورت استفاده از مدل اصلی CE-QUAL-W2 به عنوان مدل شبیه‌ساز اصلی این زمان ۴۵×۱۰^{۵} دقیقه و بیش از ۳۰۰۰ روز بوده است که بیش از چند سال به طول خواهد انجامید. بنابراین رویکرد پیشنهادی در این تحقیق، ضمن افزایش کارائی حل مسأله، امکان حل مسأله را نیز فراهم نموده است. همانگونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، دستیابی به مقادیر مینیمم مجموع مربع انحراف غلظت اکسیژن محلول از غلظت استاندارد با دستیابی به مقدار ماکزیمم میزان تولید انرژی برقابی در تضاد قرار دارند. براساس نتایج حاصل، آبگیرهای بهینه برداشت آب و میزان برداشت از هریک از آبگیرها مطابق با جدول ۲ تعیین شده‌اند. همانطور که در جواب‌های حاصل (جدول ۲) مشاهده می‌شود، بیشتر از ۹۰ درصد برداشت از آبگیرهای بالای تراز ۱۸۱ می‌باشد.

این نتیجه می‌تواند با دلائل مختلفی توجیه گردد. برای مثال بار آلودگی ورودی به مخزن کرخه، زمان ماند آب در آن، حجم عظیم جریان‌های ورودی و خروجی از مخزن سبب می‌گردند با محدودیت جرم مواد مغذی و نیز فرآیندهای چرخش جریان بالایی در مخزن مواجه گردیم.

Archive of SID
www.SID.ir

فرآیندهای چرخش جریان سبب می‌گردد که مواد مغذی فرصت کافی برای تجمع در کنار هم بودن و رشد جلبکی و واکنشهای مصرف اکسیژن در مخزن را نداشته باشند. در نتیجه در لایه‌های پائینی مخزن کرخه به غیر از دوره های گرم، با افت غلظت اکسیژن محلول قابل توجه مواجه نخواهیم گردید.

از طرفی برداشت آب از ترازهای بالاتر سبب تولید انرژی برقابی بیشتر می‌گردد، برداشت از لایه‌های بالاتر کیفیت بالاتری به لحاظ اکسیژن محلول در جریان خروجی به دنبال خواهد داشت، درصدهای برداشت کمی نیز از لایه‌های پایینی صورت می‌پذیرد تا اختلاط مورد نیاز و خروج آب با کیفیت نامطلوب (به لحاظ اکسیژن محلول) به منظور بهبود دراز مدت عملکرد داخلی مخزن را داشته باشیم. بعبارتی شرایط کیفی مخزن مورد مطالعه به گونه‌ای است که همان برداشت کم از لایه‌های پایینی در بهبود شرایط درازمدت مخزن، کافی خواهد بود.

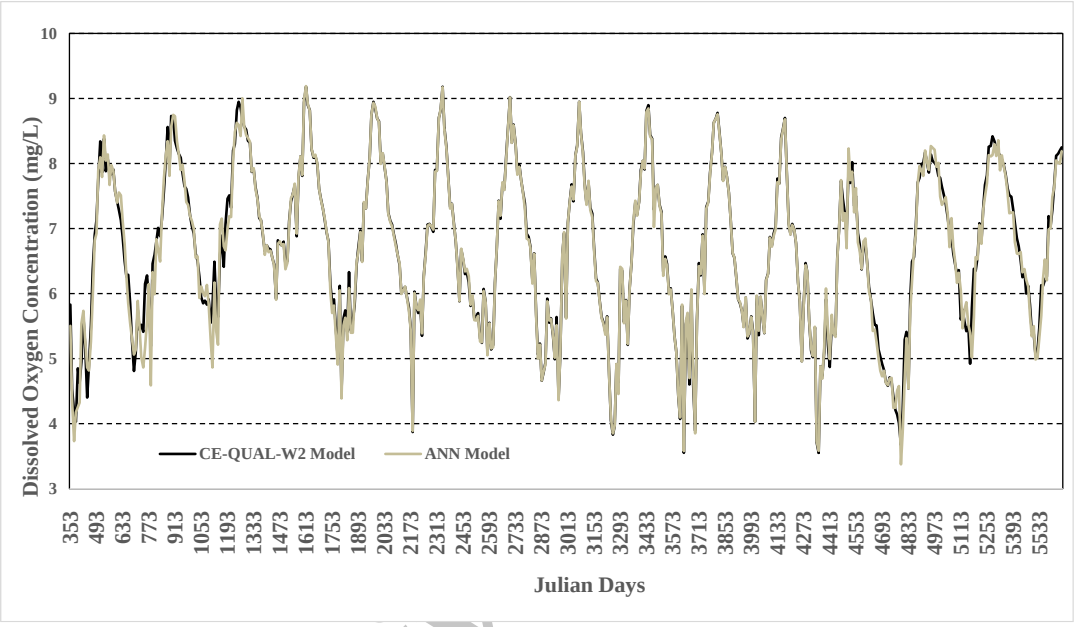

Fig. 3- Comparing the performance of DO neural network model with CE-QUAL-W2

شکل ۳- مقایسه عملکرد مدل اکسیژن محلول شبکه عصبی با CE-QUAL-W2

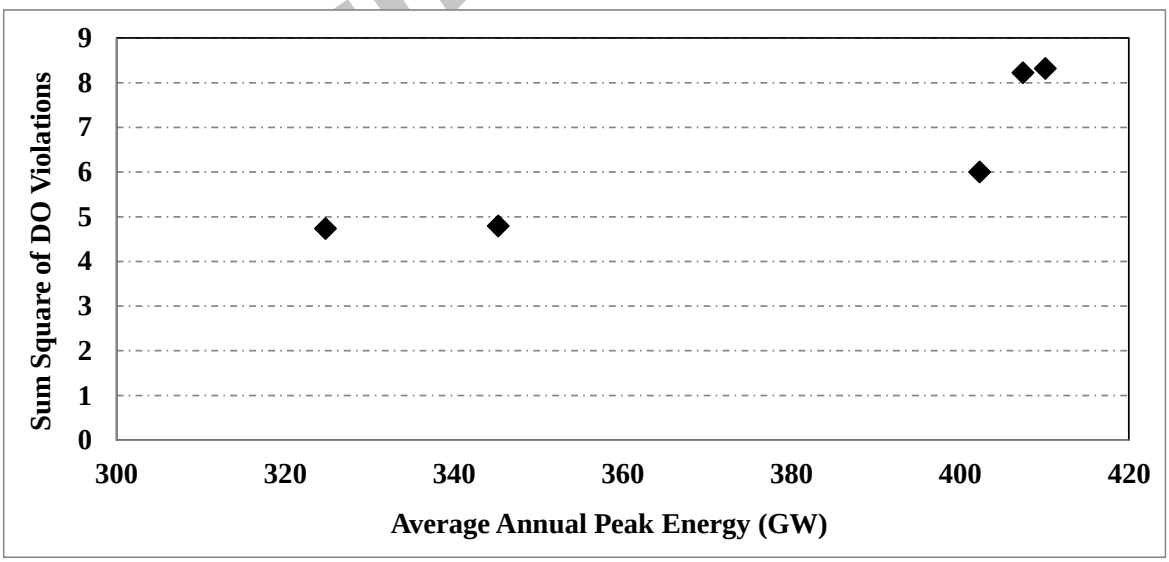

Fig. 4- Pareto front in problem of designing intakes'optimal location and withdrawal rate

شکل ۴- جبهه پرتو مسأله تعیین موقعیت و نسبت برداشت بهینه آبگیرها

www.SID.ir

Table 2- Results of ANN-MOPSO approach corresponding to Pareto front in Fig.4
جدول ۲- نتایج حاصل رویکرد ANN-MOPSO و متناظر جبهه پرتو شکل ۴

Pareto Front number	Features of each scenario	Decision variables				
Pareto front No. 1	No. of selected intake	1	3	7	9	10
	Withdrawal rate	0.93	0.03	0.02	0.01	0.01
Pareto front No. 2	No. of selected intake	3	7	8	9	10
	Withdrawal rate	0.95	0.04	0	0	0.01
Pareto front No. 3	No. of selected intake	4	5	7	9	10
	Withdrawal rate	0.03	0.92	0.05	0	0
Pareto front No. 4	No. of selected intake	1	3	8	9	10
	Withdrawal rate	0.77	0.2	0.01	0.01	0.01
Pareto front No. 5	No. of selected intake	1	5	8	9	10
	Withdrawal rate	0.81	0.16	0.01	0.01	0.01

نکته دیگر در توجیه برداشت آب از لایه‌های بالائی، به خروج بیشتر مواد مغذی از مخزن نیز می‌تواند منجر گردد. بعبارتی جریان پس از ورود به مخزن در لایه آب هم چگالی خود قرار می‌گیرد در نتیجه مواد مغذی در روزهای ابتدائی ورود خود، بیشتر در لایه‌های سطحی قرار می‌گیرند و برداشت از لایه‌های بالائی به خروج هر چه بیشتر این مواد مغذی و کاهش امکان رخداد شرایط نامطلوب کیفی می‌انجامد. البته باید دقت نمود در مخزن کرخه با طول قابل توجه مخزن، بخشی از این مواد مغذی تا رسیدن به بازه خروجی مخزن، در اثر انتقال و فرآیندهای فیزیکی دیگر مانند ته‌نشینی به لایه‌های پائین‌تر منتقل می‌گردند اما این ته نشست در طول سه ماه آنچنان قابل توجه نمی‌باشد.

به منظور ارزیابی جواب‌های بدست آمده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی با تکنیک مدل جایگزین، درستی و صحت تابع هدف کیفی اعضای جبهه پرتو با مدل عددی CE-QUAL-W2 کنترل گردیدند. در شکل ۵ سری زمانی غلظت اکسیژن محلول حاصل از متغیرهای تصمیم بهینه متناظر با اعضای جبهه پرتو ارائه شده در شکل ۴ و موقعیت‌های آبگیر جبهه پرتو سه در مقایسه با سری زمانی بهره‌برداری مخزن کرخه با موقعیت آبگیرهای موجود (حالتی که برداشت آب از آبگیرهای واقع در تراز ۱۶۱٫۵ و ۱۸۰ صورت می‌گیرد) نمایش داده شده‌اند. نتایج حاصل نشان از کارائی رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مبتنی بر مدل جایگزین در تعیین موقعیت و مقادیر بهینه برداشت آب از آبگیرهای مخزن با هدف بهبود شرایط کیفی جریان آب خروجی از مخزن و افزایش تولید انرژی برقابی پیک سالیانه دارد.

۳-۲-۱- مسأله ۲

به منظور استخراج دستورالعمل بهره‌برداری تنها در قالب برداشت انتخابی، ضرایب پارامترهای موثر بر پاسخ کیفی مخزن شامل داده‌های کیفی جریان ورودی، شرایط هواشناسی، هیدرولیکی و هیدرولوژیکی، به عنوان متغیرهای تصمیم تعریف شدند. برای این منظور، یکی از اعضای جبهه پرتو مسأله یک که نمایشگر جانمائی و مقادیر بهینه برداشت آب از مخزن است، انتخاب می‌گردد. تنها با در نظر گرفتن جانمایی ارائه شده در آن عضو جبهه پرتو مسأله یک (ترازهای ۱۹۶، ۱۹۲، ۱۸۲، ۱۷۰ و ۱۶۲)، مسأله جدیدی تعریف می‌گردد که در آن موقعیت برداشت آب از مخزن مشخص است. با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مبتنی بر فرامدل، میزان درصد برداشت آب از هر یک از آبگیرها به گونه‌ای تعیین می‌گردد تا میزان متوسط سالیانه انرژی برقآبی پیک ماکزیمم و مجموع مربع تخطی غلظت اکسیژن محلول خروجی مخزن، از میزان غلظت اکسیژن محلول استاندارد مینیمم گردد. درصد برداشت از هریک از آبگیرها مطابق با معادله ۱۰ برای هریک از بازه‌های کنترل ۱۰ روزه محاسبه می‌گردد. لازم به ذکر است که شبکه توسعه داده شده برای مسأله ۲، توسط داده‌های حاصل از ۱۵ برنامه بهره‌برداری مختلف مدل CE-QUAL-W2 آموزش و آزمون گردید. در هر کدام از این ۱۵ برنامه بهره‌برداری، آبگیرهای برداشت آب ثابت هستند و تنها میزان درصد برداشت از این آبگیرها با یکدیگر متفاوت است که به صورت تصادفی تعیین گردیدند.

ضرایب تعیین شده برای ۱۲ پارامتر تأثیرگذار بر شرایط کمی و کیفی مخزن کرخه با توجه به موقعیت تعیین شده بهینه آبگیرها، به شرح جدول ۳ است. ضرایب ماهانه این متغیرهای کیفی، هواشناسی، هیدرولوژیکی و هیدرولیکی به عنوان متغیرهای تصمیم مسأله استخراج قوانین بهره برداری از مخزن در قالب برداشت انتخابی بوده و با هدف تعیین درصدهای بهینه برداشت آب از آبگیرها در هر روز کنترل (بازه‌های زمانی ۱۰ روزه کنترل) است. بر اساس نتایج ارائه شده، تأثیر پارامترهایی مانند شار گرمای ورودی به مخزن، نیترات، آمونیم، CBOD، جلبک، دمای هوا، سرعت وزش باد، حجم آب

Archive of SID
www.SID.ir

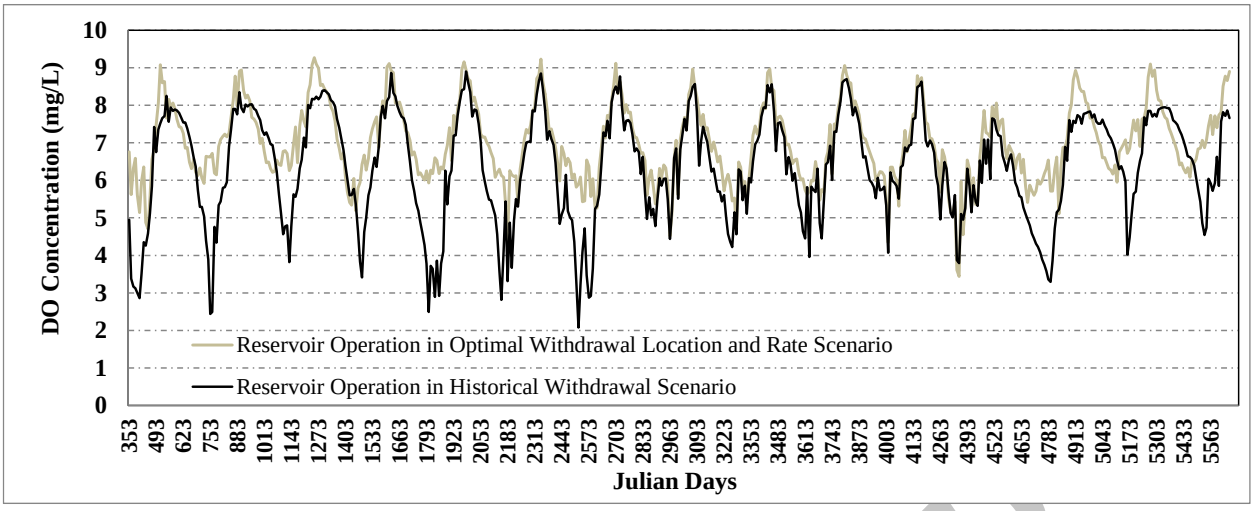

Fig. 5- Comparing reservoir outflow DO concentration in optimal and current intake designing scenarios

شکل ۵- مقایسه اکسیژن محلول خروجی سناریوهای طراحی بهینه و کنونی آبگیرها

Table 3- Optimal coefficients of reservoir operation rules considering quality-quantity objectives

جدول ۳- ضرایب بهینه پارامترهای قوانین بهره‌برداری مخزن با اهداف کمی- کیفی

Intake No.	Alga inflow flux			TSS inflow flux			NH_4 inflow flux			CBOD inflow flux			DO inflow flux			Thermal inflow flux		
No. of month	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
4	0.18	0.19	0.06	0	0	0.01	0.06	0.26	0.68	0	0	0.16	0.01	0.04	0	0.09	0.01	0.02
5	0	0	0	0	0.01	0	0.01	0	0	0	0.02	0	0	0.01	0	0	0	0
7	0.22	0	0.07	0	0.08	0.01	0	0.18	0.06	0.01	0.01	0.1	0.02	0.26	0.05	0.01	0	0.22
9	0	0	0.02	0	0	0.01	0.03	0	0	0	0.04	0	0.01	0.01	0.02	0	0.06	0.01
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0.01	0

Intake No.	Air temperature			Reservoir water level			Outflow rate			Wind speed			NO_3 inflow flux			PO_4 inflow Flux		
No. of month	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
4	0.24	0	0.01	0.15	0	0.12	0	0.01	0	0.12	0.02	0	0.27	0.09	0.08	0	0.04	0.01
5	0	0	0	0.01	0.01	0	0.01	0	0	0	0.02	0.01	0	0.03	0	0.02	0.01	0
7	0.03	0.01	0.24	0.05	0.01	0.38	0.04	0.12	0	0	0.01	0.22	0.01	0.3	0.06	0	0	0.08
9	0	0	0	0	0.01	0	0.01	0	0	0.01	0	0.05	0	0	0	0.01	0	0
10	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Numbers 1 to 3 represent the affected months from metheorological, hydraulic, hydrologic, and quality (3 is for the most recent 3 months)

اعداد ۱ تا ۳ بیانگر ماههای موثر از تأثیر عوامل هواشناسی، هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و کیفی هستند (عدد ۳ مربوط به سه ماهه اخیر است).

خروجی از مخزن و تراز سطح آب مخزن بر میزان برداشت از آبگیرهای ۴ و ۷ (واقع در ترازهای ۱۹۶ و ۱۸۲) قابل توجه است. بعبارتی هر دو عامل کمی (حجم آب خروجی مخزن و تراز سطح آب در آن) و کیفی بر میزان برداشت از هر یک از آبگیرها با هدف بهبود اهداف کمی و کیفی تأثیرگذار هستند. تأثیر فسفات و ذرات معلق بر میزان برداشت از این آبگیرها نسبت به سایر متغیرها بسیار کمتر است. بنظر آبگیرهای ۴ و ۷ علاوه بر نقش بالاتر در تولید انرژی برقابی بیشتر، با خروج عوامل موثر بر رخداد تغذیه‌گرایی مانند آمونیم، نیترات و جلبک، ماند این متغیرهای کیفی در مخزن را محدود می‌نمایند تا کیفیت درازمدت در مخزن بهبود یابد. فسفات و ذرات معلق در اثر ته‌نشینی به لایه‌های پائینی راه یافته و امکان خروج این متغیرهای کیفی از طریق آبگیرهای واقع در ترازهای پائین‌تر میسر می‌باشد. اگرچه تأثیری هر چند اندک توسط ذرات معلق بر خروجی آبگیر واقع در تراز ۱۸۲ متر ارتفاع از سطح دریا مشاهده می‌گردد. همچنین، بر اساس نتایج حاصل، دمای

www.SID.ir

هوا بر میزان برداشت از آبگیرهای ۵، ۹ و ۱۰ تأثیری ندارد. همچنین تأثیر فسفات و ذرات معلق بر میزان برداشت از آبگیرهای ۵ و ۹ مانند سایر عوامل تأثیرگذار کمی و کیفی برداشت از این آبگیرها اندک است. متغیرهای تراز سطح آب، شار گرما و شار اکسیژن محلول ورودی به مخزن بر میزان برداشت از آبگیر تحتانی (واقع در تراز ۱۶۲) تأثیرگذار هستند. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد مقادیر اندک برداشت از آبگیرهای واقع در ترازهای ۱۷۰ و ۱۶۲ در خروج بهنگام آب با کیفیت نامطلوب و ایجاد اختلاط به منظور دستیابی به کیفیت مطلوب درازمدت در مخزن مطالعاتی این تحقیق، کافی است.

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مطالعه مدیریت توأم کمیت و کیفیت منابع آب مخزن در قالب طراحی سازه‌ای و بهره‌برداری با تعیین موقعیت بهینه آبگیرهای مخزن و نسبتهای برداشت از آن (مسأله یک) صورت پذیرفت. رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مبتنی بر فرامدل در بهینه‌سازی موقعیت و نسبت برداشت از آبگیرها با هدف بهبود کیفیت جریان آب خروجی مخزن (غلظت اکسیژن محلول) و افزایش میزان انرژی برقابی پیک در حل این مسأله مورد استفاده قرار گرفت. الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات چند هدفه، مدل شبیه‌سازی عددی هیدرودینامیک و کیفیت آب CE-QUAL-W2 و شبکه عصبی مصنوعی از ابزارهای مورد استفاده در این تحقیق بوده‌اند. در ادامه، تدوین دستورالعمل بهره‌برداری از مخزن در قالب برداشت انتخابی از آبگیرهای با موقعیت مشخص از مسأله یک با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مبتنی بر فرامدل توسعه داده شده در این مطالعه صورت پذیرفت. تدوین الگوی بهره‌برداری با در نظر گرفتن اهداف توأم کمی و کیفی با تعیین ضرایب بهینه به متغیرهای هواشناسی، هیدرولوژیکی، کیفی و هیدرولیکی وابسته و استخراج گردیدند.

نتایج حاصل از حل مسأله یک، به صورت جبهه پرتوئی از اهداف متضاد (بهبود کیفیت آب خروجی و افزایش تولید انرژی برقابی) استخراج گردیدند که نشان دهنده تضاد اهداف کمی و کیفی با یکدیگر بوده است. سری زمانی غلظت اکسیژن محلول هر یک از سناریوهای بهینه حاصل از حل مسائل، در پایان با نتایج داده‌های بهره‌برداری از موقعیت کنونی آبگیرهای مخزن کرخه با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 شبیه‌سازی و با یکدیگر مقایسه گردیدند که نشان دهنده کارائی مطلوب رویکرد پیشنهادی در این تحقیق بوده است. رویکرد پیشنهادی در این تحقیق در قالب شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مبتنی بر فرامدل، ضمن افزایش کارائی، حل این مسأله بزرگ مقیاس را امکان‌پذیر نموده است. در نظر گرفتن سایر اهداف کمی و کیفی (بهبود تأمین نیازهای مصرفی (شرب، صنعت و کشاورزی)، کنترل سایر پارامترهای کیفی، استفاده از فرامدل تطبیقی، طراحی همزمان موقعیت و ظرفیت آبگیرها، تدوین دستورالعمل بهینه بهره‌برداری از مخزن در قالب اهداف کمی و کیفی با لحاظ نمودن توأم مقدار جریان دبی خروجی و نسبت برداشت از هر آبگیر، تدوین توأم دستورالعمل بهره‌برداری از مخزن در ساختار برداشت انتخابی و حذف آلاینده‌های نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای بالادست از پژوهش‌های پیشنهادی در ادامه این کار تحقیقاتی هستند. همچنین کنترل کیفیت منابع آبی در نقاط مکانی گسترده‌تر (نقاط مختلف داخل مخزن)، ارزیابی دستورالعمل بهره‌برداری مخزن با رویدادهای هیدرولوژیکی و کیفی متفاوت در جهت تکمیل این پژوهش پیشنهاد می‌گردد.

پی‌نوشت‌ها

1- Particle Swarm Optimization (PSO)

۵- مراجع

Afshar A, Saadatpour M (2009) Reservoir eutrophication modelling, sensitivity analysis, and assessment; application to Karkheh reservoir, Iran. Environmental Engineering Science 26(7):1227-1238 doi:10.1089/ees.2008.0319

Aloui BZ, Adelana SM, Gueddari M (2015) Effects of selective withdrawal on hydrodynamics and water quality of a thermally stratified reservoir in the southern side of the Mediterranean sea: a simulation approach. Environmental Monitoring and Assessment doi:10.1007/s10661-015-4509-3

Bartram J, Balance R (1996) Water quality monitoring. Van Nostrand Reinhold, New York, USA

Campbell SG, Flug M, Hanna RB (2002) Evaluating water allocations for drought management. In: Proc. of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, July 29 - August 1, Las Vegas, NV, USA

Castelletti A, Yajima H, Giuliani M, Soncini-Sessa R, Weber E (2012) Planning the optimal operation of a multi-outlet water reservoir with water quality and quantity targets. Journal of Water Resources Planning and Management 140(4):496-510

Chapra SD (1997) Surface water quality modeling. Mc Graw-Hill Inc., New York, USA

Chaves P, Kojiri T (2007) Deriving reservoir operational strategies considering water quantity and quality objectives by stochastic fuzzy neural networks. Advances in Water Resources 30:1329–1341

Archive of SID
www.SID.ir

Saadatpour M (2012) Deriving optimal reservoir operational strategy considering quality and quantity objectives. PhD thesis, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (In Persian)

Saadatpour M, Afshar A (2013) Multi-objective simulation-optimization approach in pollution spill response management model in reservoirs. Journal of Water Resource Management 27:1851-1865

Saadatpour M, Heravi A (2016) Study of environmental performance criteria in Karkheh reservoir with enhanced model of CE-QUAL-W2 (V3.72). Iran-Water Resource Research 12(3):50-64 (In Persian)

Shirangi E, Kerachian R, Shafai Bajestan M (2008) A simplified model for reservoir operation considering the water quality issues: application of the Young conflict resolution theory. Environmental Monitoring and Assessment 146:77–89

Soleimani S, Bozorg-Haddad O, Saadatpour M, Hugo A (2016) Optimal selective withdrawal rules using a coupled data mining model and genetic algorithm. Journal of Water Resources Planning and Management, 142(12) doi: http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000717

Solomatine D (2015) Surrogate modelling in model-based optimization: an introduction. The UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft, Netherland

Soltani F, Kerachian R, Shirangi E (2010) Developing operating rules for reservoirs considering the water quality issues: application of ANFIS-based surrogate models. Expert Systems with Applications 37:6639–6645

Stamou AI, Hadjibiros K, Andreadakis A, Katsiri A (2007) Establishing minimum water level for Plastiras reservoir (Greece) combining water quality modeling with landscape aesthetics. Environmental Modelling and Assessment 12:157–170

Teegavarapu RSV, Ferreira AR, Simonovic SP (2013) Fuzzy multi-objective models for optimal operation of a hydropower system. Water Resources Research 49(6):3180-3193

Xu X, Bin L, Pan C, Ding A, Chen D (2014) Optimal reoperation of multi-reservoirs for integrated watershed management with multiple benefits. Water 6:796-812

Yin XA, Yang ZF, Petts GE (2011) Reservoir operating rules to sustain environmental flows in regulated rivers. Water Resources Research 47(8) doi:10.1029/2010WR009991

Ferreira AR, Teegavarapu RSV (2012) Optimal and adaptive operation of a hydropower system with unit commitment and water quality constraints. Water Resources Management 26:707-732

Gelda RK, Effler SW (2007) Simulation of operations and water quality performance of reservoir multilevel intake configurations. Journal of Water Resources Planning and Management 133 (1):78-86

Jaleh AH, Kerachian R, Zahraei, B (1998) Water quality management in dam reservoirs combinig structural and non-structural approaches. Civil Engineering Congress, May 6-7, Tehran University, Iran (In Persian)

Hu M, Huang GH, Sun W, Li Y, Ding X, An C, Zhang X, Li T (2014) Multi-objective ecological reservoir operation based on water quality response models and improved genetic algorithm: a case study in Three Gorges reservoir, China. Engineering Applications of Artificial Intelligence 332-346

Karamouz M, Moridi A, Fayyazi HM (2008) Dealing with conflict over water quality and quantity allocation: a case study. Scientia 15(1):34-49

Karamouz M, Ahmadi A, Moridi A (2009) Probabilistic reservoir operation using bayesian stochastic model and support vector machine. Advances in Water Resources 32:1588–1600

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

Labadie JW (2004) Optimal operation of multi-reservoir systems: state-of-the-art review. Journal of Water Resources Planning and Management 130(2):93-111

Marin SC, Galelli S, Castelletti A, Goedbloed A (2013) Emulation modelling of salinity dynamics to inform real-time control of water quality in a tropical lake. 20th International Congress on Modelling and Simulation, December 1–6, Adelaide, Australia

Masoumi F, Afshar A, Torabi S (2016) Selective withdrawal optimization in river–reservoir systems; trade-offs between maximum allowable receiving waste load and water quality criteria enhancement. Environmental Monitoring and Assessment 188: 390 doi:10.1007/s10661-016-5386-0

Park Y, Cho KH, Kang JH, Lee SW, Kim JH (2014) Developing a flow control strategy to reduce nutrient load in a reclaimed multi-reservoir system using a 2D hydrodynamic and water quality model. Science of the Total Environment 467:871-80

Archive of SID
www.SID.ir