



## Optimizing Selective Withdrawal in Reservoirs to Improve Water Quality

A. Yahyaei<sup>1</sup>, A. Moridi<sup>2\*</sup>, and S.S. Mousavi Nadoushani<sup>3</sup>

### Abstract

In this study, a method has been developed that, through optimized selective withdrawal and release of contaminated water from lower level of the dam, helps reservoir water quality improvement and downstream water quality preservation. In the present study, the two-dimensional model CE-QUAL-W2 was used to simulate the reservoir water quality processes. The model was then combined with particle swarm optimization algorithm. This common simulation-optimization approach was able to find optimal operation policies to improve water quality inside and downstream of the reservoir. In order to increase the efficiency and reduce the computational time of the model, the reservoir quality simulation model was replaced with an artificial neural network model. The performance of the developed methodology was evaluated for a real case for a 2-year simulation period. Different scenarios for the reservoir operation were considered and using the simulation model (meta model), the concentration of the index pollutant was calculated and ultimately optimal operation policy of the reservoir was determined. The results showed that for the optimal operation policy the average amount of dissolved oxygen in reservoir outflow was about 25% higher than the current operating conditions. Also the status of the reservoir was improved to low eutrophication state in most of the months in comparison to the existing condition in which the reservoir eutrophication state is high in some months like June. The comparison between dissolved oxygen concentrations of the reservoir outflow in optimum operation policy with the existing operational conditions showed high efficiency of the proposed method and its significant effect on improvement of the reservoir water quality.

**Keywords:** Reservoir Quality Management, Eutrophication, Particle Swarm Optimization Algorithm, Selective Withdrawal, CE-QUAL-W2.

Received: October 25, 2018

Accepted: February 7, 2019

## بهینه‌سازی برداشت انتخابی در مخازن با هدف بهبود کیفیت آب

علیرضا یحیائی<sup>۱</sup>، علی مریدی<sup>۲\*</sup> و سیدسعید موسوی ندوشنی<sup>۳</sup>

### چکیده

در این مطالعه، روشی توسعه داده شده است که با استفاده از برداشت انتخابی و رهاسازی آب از زیرلایه مخزن، به بهبود شرایط کیفی مخزن و کیفیت آب پایین دست کمک می‌نماید. در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی فرآیندهای کیفی در مخزن، با استفاده از مدل شبیه‌سازی دو بعدی CE-QUAL-W2 انجام می‌گیرد. سپس این مدل با یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیب شده است. این رویکرد متداول شبیه‌سازی-بهینه‌سازی قادر به تحقق سیاست‌های بهره‌برداری بهینه، برای کنترل کیفیت آب در مخزن و پایین دست آن است. الگوریتم دسته ذرات به عنوان الگوریتم بهینه‌سازی بکار برده می‌شود. جهت کاهش زمان محاسبات، از یک مدل داده‌مبنا شبکه عصبی مصنوعی به عنوان جایگزین مدل شبیه‌سازی استفاده می‌شود. عملکرد روش توسعه یافته برای یک مورد واقعی برای یک دوره شبیه‌سازی ۲ ساله ارزیابی شده است. سناریوهای مختلف قابل قبول برای بهره‌برداری از مخزن در نظر گرفته شده و با استفاده از مدل شبیه‌سازی (مدل جایگزین) غلظت آلاینده شاخص محاسبه می‌شود و در نهایت سیاست بهره‌برداری بهینه از مخزن تعیین می‌شود. نتایج حاصل نشان می‌دهد بطور میانگین مقدار اکسیژن محلول خروجی از مخزن به ازای سیاست بهره‌برداری بهینه نسبت به وضعیت موجود بهره‌برداری، حدود ۲۵ درصد بهبود یافته است. وضعیت تغذیه‌گرایی مخزن نیز نسبت به وضع فعلی که در بعضی از ماه‌ها مانند تیرماه در وضعیت تغذیه‌گرایی شدید قرار دارد، بهبود یافته و در بیشتر ماه‌های سال در وضعیت تغذیه‌گرایی متوسط و کم قرار می‌گیرد. مقایسه غلظت اکسیژن محلول خروجی از مخزن در سیاست بهینه بهره‌برداری با وضعیت بهره‌برداری موجود، کارایی بالای روش پیشنهادی و بهبود قابل ملاحظه کیفیت آب خروجی از مخزن را نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** مدیریت کیفی مخزن، تغذیه‌گرایی، الگوریتم دسته ذرات، برداشت انتخابی مخزن، CE-QUAL-W2.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۸/۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۱۱/۱۸

1- M.Sc. Graduate of Water Resources Engineering, Department of Water Resources, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: [a\\_moridi@sbu.ac.ir](mailto:a_moridi@sbu.ac.ir)

3- Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: [sa\\_mousavi@sbu.ac.ir](mailto:sa_mousavi@sbu.ac.ir)

\*- Corresponding Author

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

\*- نویسنده مسئول  
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد جمعیت، پیشرفت صنعت و نیز تغییرات اقلیمی سبب تنش فزاینده بر منابع آبی گردیده است. این وضع، سبب مورد توجه قرار گرفتن مسائل کیفی منابع آبی در کنار مسائل کمی، در طراحی و بهره‌برداری از مخازن آبی شده است و محققین تلاش‌هایی در جهت شبیه‌سازی کیفی منابع آبی و تعیین سیاست بهره‌برداری بهینه از مخازن با در نظر گرفتن مسائل کیفی و حرکت در جهت توسعه پایدار انجام داده‌اند.

یکی از مشکلات رایج در مخازن، تغذیه‌گرایی است که در اثر ورود بیش از حد مواد مغذی به مخزن و رشد بیش‌ازحد جلبک‌ها، به وجود می‌آید. از پیامدهای تغذیه‌گرا شدن مخازن می‌توان به تسریع پیری زودرس مخازن، کاهش اکسیژن محلول در آب‌های عمقی، تغییر رنگ و بوی آب، مشکلات در زمینه تصفیه آب و محدودیت‌های کاربری آب اشاره کرد. یکی از راه‌های بهبود تغذیه‌گرایی، اعمال یک سیاست بهره‌برداری کمی و کیفی مناسب از مخزن و رهاسازی آب از لایه‌های زیرین مخزن جهت خروج مواد مغذی است. از راهکارهای دیگر می‌توان به هوادهی در مخزن و کنترل آلاینده‌های منابع آلودگی حوضه آبریز بالادست مخزن اشاره کرد.

یکی از عواملی که سبب تشدید مسأله تغذیه‌گرایی می‌شود، بروز لایه‌بندی حرارتی در مخزن می‌باشد. لایه‌بندی حرارتی که در اثر اختلاف دما و چگالی در مخزن ایجاد می‌شود موجب تغییر کیفیت آب در اعماق مختلف می‌گردد. بنابراین تراز برداشت آب در کیفیت آب خروجی و کیفیت آب موجود در مخزن مؤثر است. بنابراین مدیریت کیفی و بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن از طریق برداشت انتخابی از دریچه‌های مختلف امکان‌پذیر است.

محققان در طول سال‌های پیشین، پژوهش‌هایی در زمینه شبیه‌سازی کیفی مخازن و بررسی شرایط کیفی آن‌ها با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی کیفی انجام داده‌اند (Kuo et al., 2006; Gelda & Effler, 2007; Shirangi et al., 2007; Xu et al., 2012; Fayaed et al., 2013; Deus et al., 2013; Rangel- Ahmad et al., 2014; Sadeghian et al., 2015; Peraza et al., 2016; Shourian et al., 2016; Saadatpour and Heravi, 2016). با در نظرگیری اهداف کیفی در مخازن در کنار اهداف کمی، مسائل بهره‌برداری از مخزن شکل جدید به خود گرفت. در این زمینه پژوهشگران، بهره‌برداری از مخازن با در نظرگیری اهداف کمی و کیفی و همچنین رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی را بررسی کرده‌اند. (Chaves & Kojiri (2007، سیاست بهره‌برداری بهینه از

مخزن با در نظر گرفتن اهداف کیفی را بررسی کردند. ایشان از یک روش شبکه عصبی فازی استوکستیک که توسط یک الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک آموزش داده می‌شود برای تعیین سیاست بهینه بهره‌برداری از مخزن استفاده کردند. نتایج نشان داد در صورت وجود یک مدل شبیه‌سازی دقیق از مخزن می‌توان با در نظر گرفتن توابع هدف کمی و کیفی به یک سیاست بهره‌برداری بسیار بهتر دست یافت. (Kerachin & Karamouz (2007، با استفاده از مدل شبیه‌سازی یک بعدی توسعه داده شده و لینک آن با الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و بکارگیری مدل غیرقطعی حل اختلاف، سیاست بهره‌برداری بهینه از مخزن را با در نظرگیری اهداف کمی و کیفی بررسی کردند. (Dhar & Datta (2008، روشی برای بهره‌برداری بهینه از مخازن برای کنترل کیفیت آب در مکان‌های پایین دست توسعه داده‌اند. ایشان با استفاده از مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2 فرآیندهای فیزیکوشیمیایی را شبیه‌سازی کرده و با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی ژنتیک مقادیر بهینه رهاسازی را بررسی کردند. (Afshar & Saadatpour (2009، تغذیه‌گرایی مخزن سد کرخه را با مدل دوبعدی CE-QUAL-W2 بررسی کردند. ایشان با تغییر در بار آلاینده‌های ورودی به سیستم، رفتار سیستم را بررسی کردند. نتایج حاکی از رخداد پدیده واژگونی در مخزن سد کرخه در بهمن ماه می‌باشد، هم‌چنین اهمیت بار فسفر در کنترل روند تغذیه‌گرایی در مخزن کرخه بود. (Rani & Moreira (2010، ترکیب مدل‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی را بررسی کرده و ظرفیت بکارگیری آن‌ها در بهره‌برداری از مخزن را بررسی کردند. ایشان بیان کردند روش‌های بهینه‌سازی می‌توانند بسیار مهم باشند زمانی که همراه با مدل شبیه‌سازی بکار برده می‌شوند و دو رویکرد زمانی که ترکیب شوند بهترین نتایج را می‌دهند. (Castelletti et al. (2013، با استفاده از مدل شبیه‌سازی کیفی DYRESM-CAEDYM، مخزن را شبیه‌سازی کردند و با استفاده از یک الگوریتم یادگیری تقویتی دسته‌ای به نام fitted Q-iteration (FQI، اقدام به بهینه‌سازی تأمین اهداف کمی و کیفی مخزن نمودند. نتایج نشان می‌دهد که کنترل کیفیت مخزن و پایین دست آن می‌تواند از طریق سیاست بهره‌برداری بهینه به وسیله برداشت انتخابی از دریچه‌های مخزن صورت گیرد. (Giuliani et al. (2013، ایشان یک روش جدید برای تعیین سیاست بهره‌برداری بهینه از خروجی‌ها با در نظر گرفتن اهداف کمی و کیفی ارائه دادند. مدل شبیه‌سازی یک بعدی (DYRESM-CAEDYM) و الگوریتم یادگیری تقویتی و یک روش کاهش تعداد اهداف در مدل بهینه‌سازی در این مقاله استفاده شدند. نتایج نشان دادند کنترل کمی و کیفی آب به طور همزمان از طریق سیاست بهره‌برداری و بهره‌برداری بهینه از طریق برداشت انتخابی مؤثر و مطلوب است. (Soleimani et al. (2016، بدست آوردن بهره‌برداری

آب از لایه‌های مختلف را فراهم می‌نماید که به این ترتیب امکان کنترل دما و کیفیت آب تخلیه شده فراهم می‌گردد (Saadatpour and Heravi, 2016).

برداشت انتخابی، به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر بهبود وضعیت کیفی مخزن و همچنین تعیین سیاست مطلوب بهره‌برداری از مخزن ارائه شده است. در این مطالعه، به منظور تعیین سیاست بهره‌برداری بهینه از مخزن سیمره از رویکرد تلفیق شبیه‌سازی و بهینه‌سازی استفاده شده است. تمرکز اصلی روی تخلیه آب از لایه‌های زیرین به منظور خروج مواد مغذی از مخزن و همچنین افزایش غلظت اکسیژن محلول می‌باشد. این هدف که یکی از راهکارهای بهبود وضعیت تغذیه‌گرایی مخزن می‌باشد، در جهت بهبود وضعیت کیفی مخزن تعریف شده است.

به منظور شبیه‌سازی شرایط کیفی فعلی مخزن سد سیمره و پیش‌بینی شرایط محتمل در اثر بهره‌برداری آتی و پیش‌بینی تغییرات کیفیت آب ناشی از آن، از یک مدل شبیه‌سازی کیفی مخزن به نام CE-QUAL-W2 استفاده شده است. با استفاده از نتایج این مدل، اثر مقدار جریان خروجی از دریچه‌های مخزن، بر روی مقدار غلظت اکسیژن خروجی از دریچه‌ها بررسی شده است. به منظور کاهش زمان شبیه‌سازی و پیچیدگی مدل کیفی، از روش داده مینا شبکه عصبی به عنوان جایگزین مدل شبیه‌سازی کیفی استفاده شده است. مدل‌های جایگزین، مدل‌هایی هستند که 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 بکار برده می‌شوند (Saadatpour and Javaheri, 2017).

همچنین به جهت تعیین سیاست بهره‌برداری بهینه، یک روش شبیه‌سازی- بهینه‌سازی با استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم بهینه‌سازی PSO، بکار شده است. در شکل ۱ روندنمای انجام این مطالعه، بیان شده است.

## ۲-۱- مطالعه موردی

سد سیمره در غرب ایران و در استان ایلام واقع شده است. این سد در حوضه آبریز کرخه قرار دارد. جریان اصلی ورودی به این مخزن توسط رودخانه سیمره می‌باشد. رودخانه سیمره از به هم پیوستن رودخانه‌های قره‌سو و گاماسیاب تشکیل شده است.

بهینه‌سازی از دریچه‌های مخزن جهت کنترل شرایط حرارتی مخزن را بررسی کردند. ایشان برای شبیه‌سازی دمای مخزن و دمای آب خروجی از مدل شبیه‌ساز CE-QUAL-W2 استفاده نمودند. در ادامه مدل داده مینای LIBSVM<sup>۱</sup> جایگزین مدل CE-QUAL-W2 شده و با استفاده از ترکیب مدل جایگزین و الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک تک‌هدفه سیاست بهره‌برداری بهینه برای مخزن مشخص شد. (Saadatpour and Javaheri, 2016) با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مدیریت کمی و کیفی مخزن را بررسی کردند. ایشان جهت بهبود عملکرد روش حل مسأله، از یک مدل داده مینا شبکه عصبی به عنوان جایگزین مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2 استفاده کردند و با تلفیق مدل جایگزین و الگوریتم بهینه‌سازی PSO، سیاست بهره‌برداری بهینه از مخزن را بررسی کردند. نتایج حاصل نشان از کارایی بالای روش پیشنهادی در مدیریت کیفی مخزن داشت.

برداشت انتخابی از مخزن، بهینه‌سازی سیاست بهره‌برداری از مخزن و خارج کردن آب از زیرلایه مخزن، روش‌هایی هستند که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. در مطالعات پیشین در مورد اثر برداشت انتخابی بر تغذیه‌گرایی کمتر بحث شده است و در اغلب مواقع پارامتر مورد بررسی در این مطالعات شوری بوده است. در بعضی از مطالعات که بررسی روی پدیده تغذیه‌گرایی در مخزن انجام شده، شاهد عدم بکارگیری مدل بهینه‌سازی هستیم. همچنین تخلیه آب و خروج مواد مغذی از لایه‌های زیرین مخزن (زیرلایه) در فصولی که مخزن دچار لایه‌بندی شدید می‌شود روشی است که کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله روشی توسعه داده شده است که با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی و همچنین با استفاده از روش برداشت انتخابی به عنوان یکی از راهکارهای بهبود وضعیت کیفی مخزن، سیاست بهره‌برداری بهینه از مخزن با هدف کاهش مواد مغذی و بهبود وضعیت تغذیه‌گرایی در مخزن مشخص می‌شود. همچنین در مطالعات گذشته، عدم در نظرگیری پیچیدگی زیاد محاسبات و زمان اجرای طولانی از مسائل قابل توجه است. در این مقاله، سعی شده تا با بکارگیری یک مدل مبتنی بر داده شبکه عصبی مصنوعی<sup>۲</sup> و جایگزین‌سازی آن با مدل شبیه‌سازی مخزن، پیچیدگی و زمان اجرای مدل، کاهش داده شود. تلفیق شبکه عصبی و الگوریتم بهینه‌سازی PSO، بهترین حالت کیفی ممکن برای خروج آب از دریچه‌های مخزن را تعیین می‌کند که یکی از راهکارهای مدیریت کیفی مخزن است.

## ۲-۲- روش انجام تحقیق

برای کاهش اثرات اکولوژیکی احداث سدها، برخی سدها با تجهیزات و ابزار برداشت انتخابی تجهیز می‌شوند که امکان برداشت و اختلاط

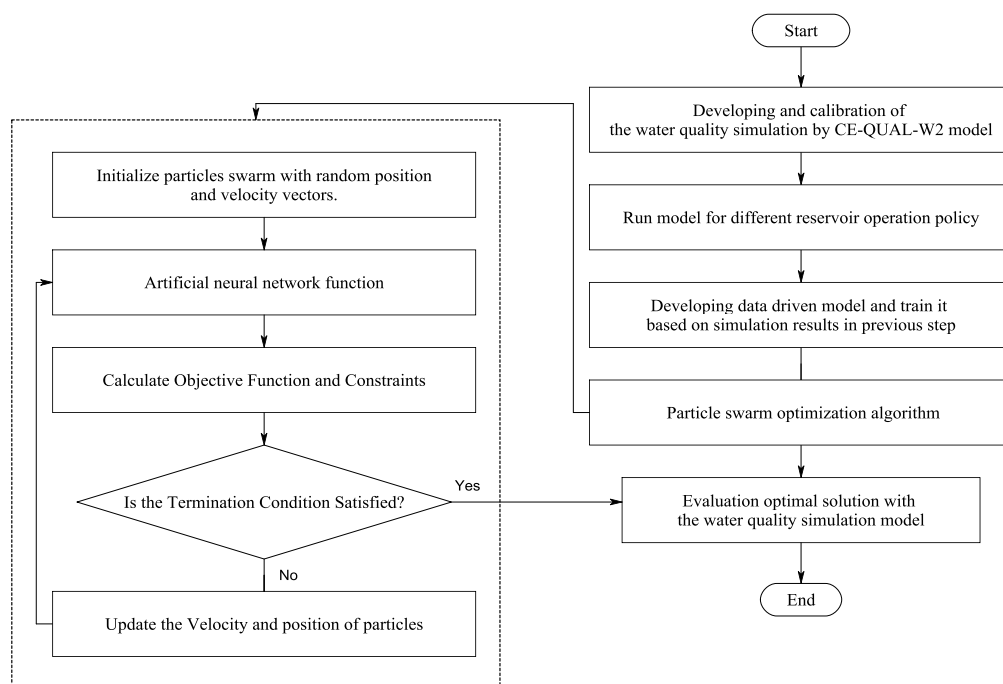


Fig. 1- Schematic of the simulation- optimization model based on the meta-model

شکل ۱- شماتیک کلی مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مبتنی بر مدل جایگزین

تا مهر به‌عنوان دوره خشک سال می‌باشند. در بین ماه‌های سال نیز ماه بهمن (فوریه) پرآب‌ترین ماه سال می‌باشد. مقادیر پارامترهای کیفی ورودی به مخزن نیز برای سال آبی ۱۳۹۲ اندازه‌گیری و در مدل‌سازی استفاده شده است. در شکل ۳ دبی ورودی به مخزن در بازه زمانی اندازه‌گیری، نمایش داده شده است.

## ۲-۲- مدل شبیه‌سازی کیفی مخزن

با توجه به شکل دریاچه مخزن سد سیمره که از نوع مخازن طولی و باریک است، در این مطالعه مدل دوبعدی CE-QUAL-W2 انتخاب شده است. مدل CE-QUAL-W2 در سال ۱۹۷۵ توسط گروه مهندسی ارتش آمریکا توسعه یافته و قابلیت شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرودینامیکی و کیفی را دارد. این مدل برای مخازن توسعه یافته است ولی می‌تواند برای رودخانه‌ها و خورها نیز به کار رود. این مدل دو بعدی از روش تفاضلات محدود استفاده نموده و قابلیت شبیه‌سازی توزیع قائم و طولی انرژی حرارتی و مواد شیمیایی و بیوشیمیایی انتخاب شده در توده آبی را در طول زمان دارد و قادر به شبیه‌سازی حجم، سطح آب، چگالی، سرعت‌های قائم و طولی و غلظت اجزای کیفی آب می‌باشد. این مدل برای مخازن و دریاچه‌های نسبتاً طولانی و باریک جهت نمایش پارامترهای کیفی به صورت نیمرخ قائم و طولی بسیار مناسب می‌باشد (Cole & Wells, 2006).

زیرحوضه‌های آبریز بالادست سد سیمره شامل گاماسیاب، کشکان، سیمره و قره‌سو هستند، که بخشی از (حدود ۵۵ درصد) حوضه آبریز رودخانه کرخه می‌باشند که شامل بخش‌هایی از استان‌های همدان، کرمانشاه، ایلام و لرستان می‌باشد. این رودخانه با عبور از رشته کوه‌های زاگرس در غرب کشور از سمت شمال به جنوب، به درازای ۷۷۵ کیلومتر امتداد یافته و در مسیر جریان خود دلتای وسیعی را تشکیل می‌دهد که به دلیل مصارف شرب، کشاورزی و آبی‌پروری حائز اهمیت است.

با آبیگری مخزن سد سیمره از اواخر فروردین ماه ۱۳۹۰، این سد با مشکلات زیست‌محیطی مواجه شده و کیفیت آب در مخزن دچار افت شد. در شکل ۲، موقعیت حوضه آبریز کرخه در کشور و همچنین موقعیت سد سیمره در این حوضه قابل مشاهده است.

## ۱-۱-۲- اطلاعات پایه

اطلاعات مربوط به دبی ورودی و پارامترهای کیفی ورودی به مخزن با استفاده از نتایج نمونه‌برداری پایش ماهیانه ایستگاه S1 استخراج شده است. جریان ورودی روزانه به مخزن در بازه زمانی فروردین ۱۳۹۰ تا دی‌ماه ۱۳۹۲ اندازه‌گیری شده است. بر اساس اطلاعات استخراج شده در دوره ۷ ماهه آبان ۹۱ (نوامبر ۲۰۱۲) تا اردیبهشت ۹۲ (می ۲۰۱۳) دوره پر آب جریان ورودی به مخزن بوده و ۵ ماه خرداد

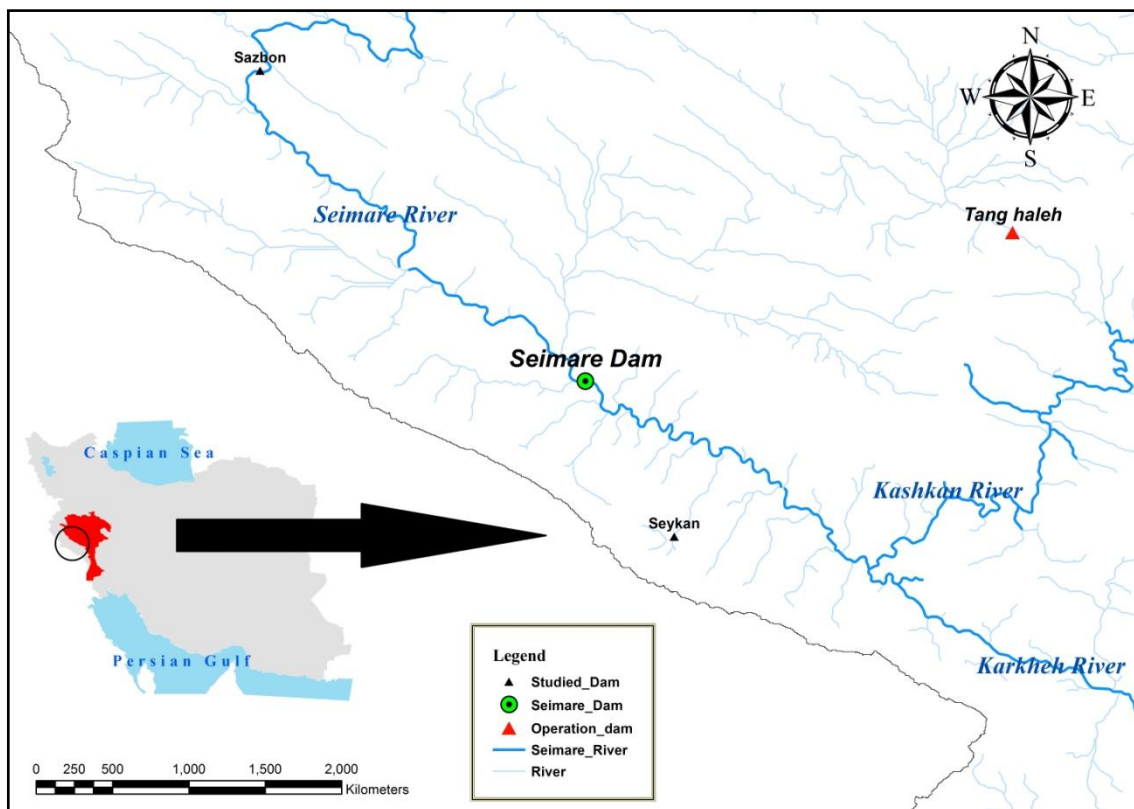


Fig. 2- Location of the Seimare Dam in Karkheh watershed

شکل ۲- موقعیت سد سیمره در حوضه آبریز کرخه

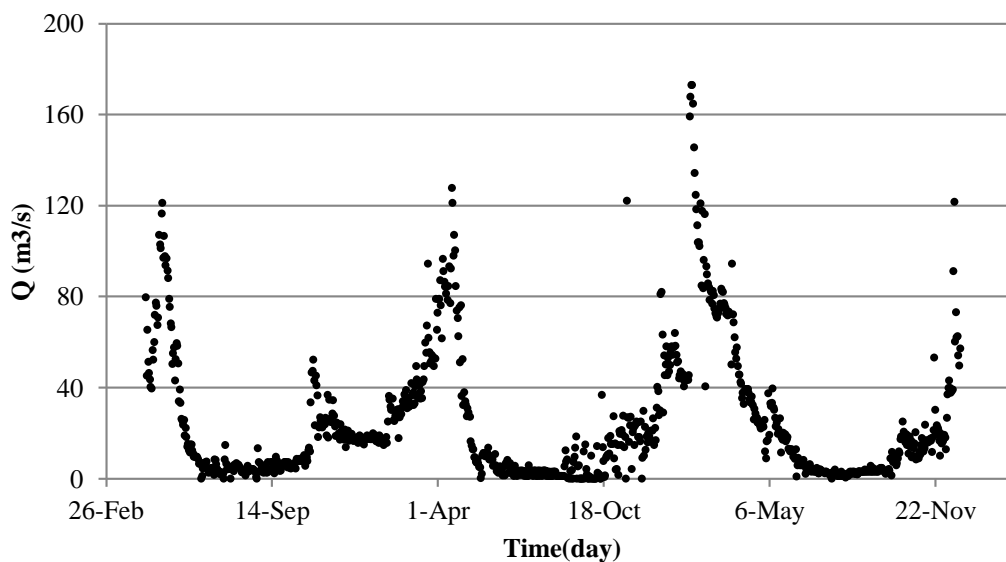


Fig. 3- Daily inflow to Seimare reservoir

شکل ۳- جریان ورودی روزانه به مخزن سد سیمره

به این ترتیب شرایط زیستی مناسب‌تری برای پایاب سد فراهم گردد. تعیین جایگاه زیستی در پیکره‌های آبی از دیگر قابلیت‌های جدید این مدل، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در خصوص حجم آبی قابل

در نسخه جدید مدل CE-QUAL-W2 قابلیت‌های جدیدی در خصوص بررسی مباحث زیست‌محیطی، کیفیت آب و اصلاح نحوه بهره‌برداری از مخزن در ساختار برداشت انتخابی به صورت اتوماتیک به منظور بهبود عملکردهای زیستی پایاب سد گنجانده شده است تا

### ۲-۲-۱- کالیبراسیون مدل

اولین گام از واسنجی مدل مربوط به واسنجی هندسه مخزن می‌باشد. جهت واسنجی هندسه همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، مقادیر ارتفاع-حجم حاصل از مدل و شرایط واقعی با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر مدل شده کاملاً با مقادیر مشاهداتی مطابقت دارد و مقدار خطای آن‌ها، براساس شاخص RMSE برابر  $0/02$  است که بیانگر خطای بسیار ناچیز و قبل قبول است.

نتایج مدل محاسباتی مخزن سد سیمره به صورت ماهیانه استخراج و با نتایج مشاهداتی مقایسه گردیده است. برای این کار از داده‌های مشاهداتی اندازه‌گیری شده در ایستگاه S2 واقع در مخزن استفاده شده است. موقعیت این ایستگاه درون مخزن سد و نزدیک به دیواره سد می‌باشد.

دسترسی مناسب برای حیات آبیان بر اساس معیارهای دما و اکسیژن محلول فراهم نماید (Saadatpour and Heravi, 2016).

شبیه‌سازی کیفی مخزن در یک دوره زمانی دو ساله از دی‌ماه ۱۳۹۰ تا دی‌ماه ۱۳۹۲ (2013-2012)، صورت گرفته است. مخزن سد سیمره تقریباً تک‌شاخه می‌باشد و در شبیه‌سازی هندسی آن، تعداد قطعات دریاچه مخزن، ۲۸ عدد در نظر گرفته شده است. همچنین فاصله بین مقاطع عرضی ۲۰۰۰ متر می‌باشد. تقسیم‌بندی عمقی مخزن در مدل به صورت لایه‌های با عمق ۴ متر و در ۳۲ لایه و از تراز ۶۰۰ متر (تراز کف مخزن) تا تراز ۷۲۰ متر (تراز نرمال مخزن) فرض شده است. در شکل شماره ۳ و ۴ پلان و موقعیت مقاطع عرضی و لایه‌های عمقی پیش‌بینی شده در مدل مخزن سد سیمره در مدل مشاهده می‌شود.

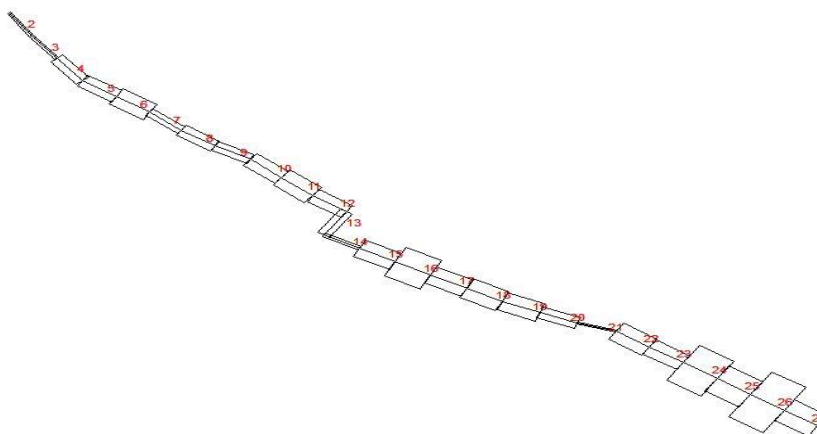


Fig. 4- Seimare reservoir CE-QUAL-W2 segmentation

شکل ۴- مقاطع قطعه‌بندی مخزن سد سیمره

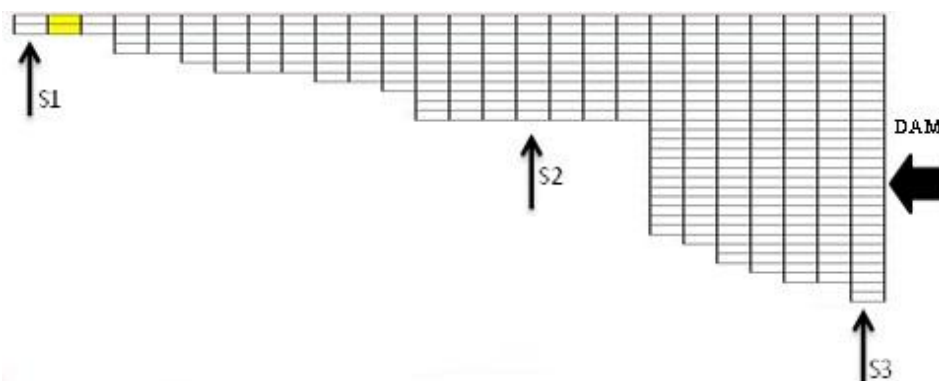


Fig. 5- Seimare reservoir computational grid and location of the monitoring stations

شکل ۵- لایه‌های عمقی مخزن سد سیمره و موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری

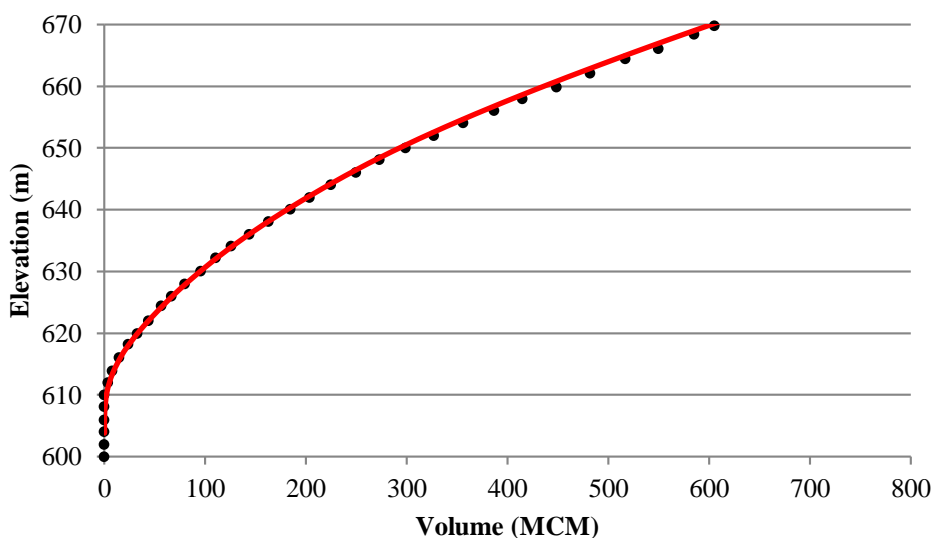


Fig. 6- Results of model calibration for simulation of volume – elevation curve

شکل ۶- نتایج کالیبراسیون مدل برای منحنی حجم- ارتفاع

نشان از کارکرد مناسب مدل و قابل اطمینان بودن نتایج دارد. در شکل ۷ نتایج واسنجی دما ارائه شده است.

برای این منظور پارامترهای دما، اکسیژن محلول و غیره جهت واسنجی و صحت‌سنجی مدل انتخاب شده است. با توجه به قیاس صورت گرفته و بررسی داده‌های مدل‌سازی شده و مشاهداتی نتایج

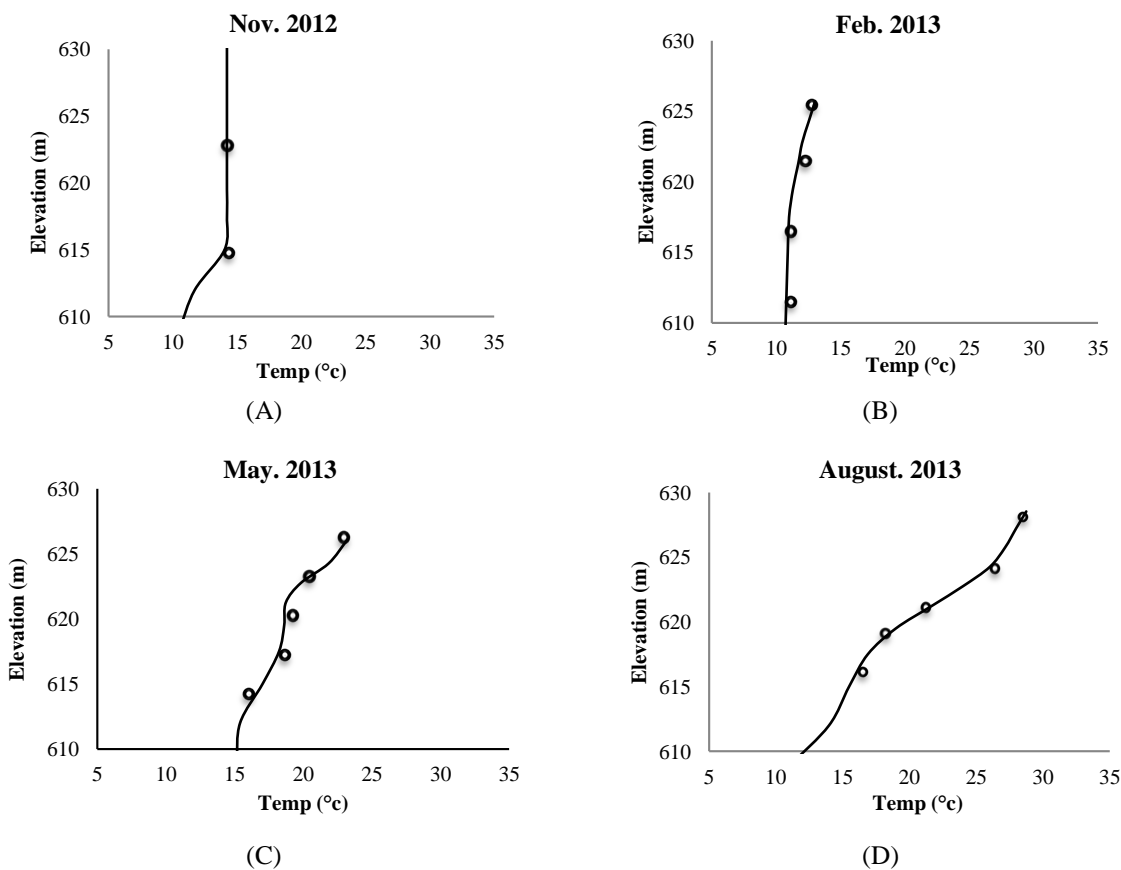


Fig. 7 - Calibration results of temperature in S2 station

شکل ۷- نتایج کالیبراسیون مدل برای دما در ایستگاه S2

ورودی به مدل شبکه عصبی در این مطالعه انتخاب شده است. براساس شاخص USEPA، وضعیت تغذیه‌گرایی با استفاده از اندازه‌گیری پارامترهای فسفر کل، نیتروژن کل، عمق سکی و اکسیژن محلول زیرلایه تعیین می‌گردد. بر همین اساس در این مطالعه، پارامتر غلظت اکسیژن محلول به عنوان پارامتر شاخص انتخاب شده است و در نتیجه خروجی مدل شبکه عصبی، مقدار اکسیژن محلول زیر لایه است. شکل ۸ پارامترهای ورودی و خروجی مدل شبکه عصبی مصنوعی را نمایش می‌دهد.

همچنین برآورد صحیح پارامترهای شبکه عصبی از قبیل تعداد نرون‌ها، توابع آموزش و انتقال و غیره می‌تواند در میزان دقت و کارایی مدل جایگزین مؤثر باشد. پس از ساخت مدل شبیه‌سازی کیفی مخزن و صحت‌سنجی آن، در مرحله بعد مدل شبکه عصبی براساس اطلاعات حاصل از مدل CE-QUAL-W2 و داده‌های ورودی تعریف شده برای مسأله مورد بررسی در این تحقیق، آموزش و صحت‌سنجی گردیده است.

#### ۲-۴- فرمول‌بندی مسأله

در مدل توسعه داده شده، مقدار آب خروجی از دریاچه زیرین مخزن (زیرلایه) به عنوان متغیر تصمیم می‌باشد.

#### ۲-۳- شبکه عصبی مصنوعی (مدل جایگزین)

در این مطالعه از مدل شبکه عصبی مصنوعی به عنوان یک مدل جایگزین استفاده شده است. شبکه عصبی مصنوعی به عنوان یک مدل مبتنی بر داده، برای یادگیری توابع گوناگون نظیر توابع با مقادیر حقیقی، توابع با مقادیر گسسته و توابع با مقادیر برداری می‌باشد. ایده‌ی اصلی این گونه شبکه‌ها الهام‌گرفته از شیوه کارکرد سیستم عصبی زیستی، برای پردازش داده‌ها و اطلاعات به منظور یادگیری و ایجاد دانش می‌باشد. شبکه عصبی از تعداد دلخواهی لایه و نرون تشکیل می‌شود که مجموعه ورودی را به خروجی ربط می‌دهند (Araghinezhad, 2014).

جهت توسعه مدل شبکه عصبی و جایگزینی آن با مدل شبیه‌سازی کیفی مخزن، انتخاب پارامترهای ورودی و خروجی از مدل جایگزین، حائز اهمیت است. انتخاب پارامترهای ورودی و خروجی مناسب، مستلزم شناخت کافی از پارامترها و فرآیندهای کیفی رخ داده در مخزن و تأثیر آن‌ها بر وضعیت کیفی مخزن می‌باشد. در این مطالعه ارزیابی وضعیت کیفی مخزن و تغذیه‌گرایی توسط شاخص ارائه شده توسط USEPA انجام می‌گیرد. با توجه به پارامترهای کیفی مهم در وضعیت کیفی مخزن، دبی جریان ورودی به مخزن، اکسیژن محلول ورودی، فسفر ورودی، نترات ورودی، آمونیوم ورودی و تراز سطح آب در مخزن و همچنین جریان خروجی از مخزن به عنوان پارامترهای

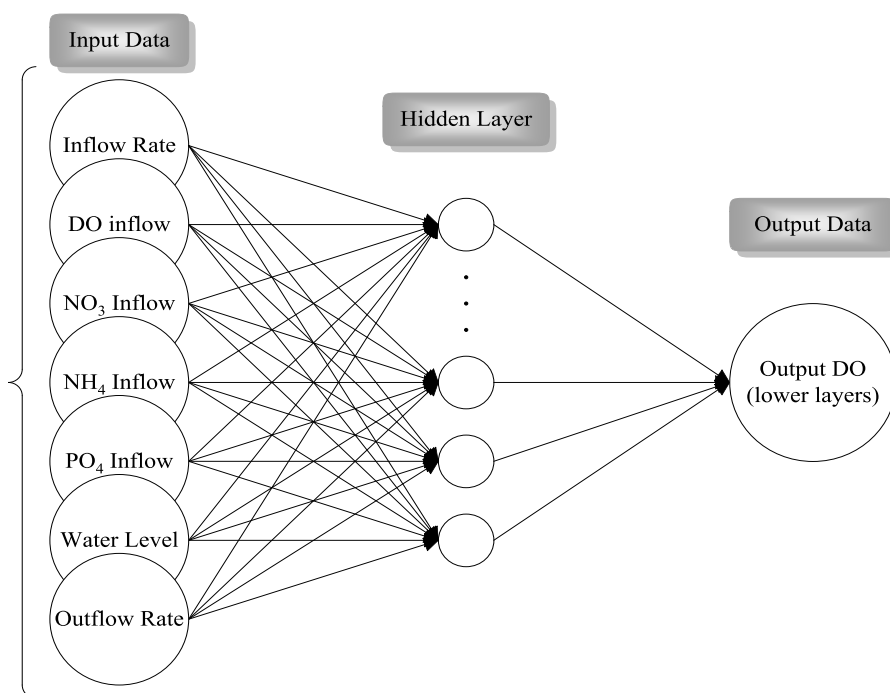


Fig. 8- Input and output data in neural network model

شکل ۸- پارامترهای ورودی و خروجی مدل شبکه عصبی



ماه  $t$ ،  $h$  تعداد لایه‌های مخفی مدل شبکه عصبی،  $W_h$  پارامترهای مربوط به وزن‌های مدل شبکه عصبی برای لایه  $h$ ،  $b_h$  ثابت‌های مدل شبکه عصبی برای لایه  $h$  هستند.

همچنین در مدل بالا، معادله (۱) بیانگر توابع هدف می‌باشد که بیانگر افزایش غلظت اکسیژن محلول زیرلایه با هدف بهبود شرایط تغذیه‌گرایی است. معادله (۲) نشان می‌دهد که کل رهاسازی ماهانه برابر است با مجموع رهاسازی از خروجی‌ها در آن ماه. معادلات (۳) تابع مدل جایگزین (شبکه عصبی مصنوعی) را بیان می‌کنند. معادله (۴) نشان‌دهنده معادله پیوستگی آب در مخزن در هر ماه است. معادله (۵) بیانگر حداکثر و حداقل ظرفیت مخزن است. معادله (۶) نشان می‌دهد حداکثر مقدار رهاسازی در هر ماه برابر ظرفیت دریاچه‌های مخزن و حداقل آن برابر صفر است. معادله (۷) نشان می‌دهد غلظت متغیر کیفی هر خروجی در هر ماه تابعی از دمای جریان ورودی به مخزن، مقدار جریان ورودی به مخزن، کیفیت جریان خروجی به مخزن، دمای هوا در محل مخزن، مقدار رهاسازی از هر خروجی مخزن و ضریب تغییرات متغیر کیفی می‌باشد. معادله (۸) نشان‌دهنده نحوه محاسبه میانگین غلظت متغیر کیفی در هر ماه است. معادله (۹) بیانگر قید حداقل غلظت اکسیژن محلول استاندارد آب رهاسازی از مخزن برای پایین دست است. معادله (۱۰) بیانگر قید بیشتر بودن رهاسازی از مقدار نیاز در هر ماه و تأمین نیاز پایین دست است.

## ۲-۵- الگوریتم تکاملی بهینه‌سازی دسته ذرات

پس از آموزش شبکه عصبی، مدل بهینه‌سازی با رویکرد استفاده از مدل شبیه‌سازی جایگزین برای تعیین مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم در مسائل مورد استفاده قرار گرفته است. در پایان تابع هدف کیفی تعیین شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی، توسط مدل فرآیندی CE-QUAL-W2 مورد ارزیابی قرار گرفته است. به این منظور از الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی PSO استفاده شده است. الگوریتم بهینه‌سازی PSO، اولین بار توسط کندی و ابرهاردت در سال ۱۹۹۵ مطرح گردیده است. آن‌ها این الگوریتم را از روی رفتار گروهی پرندگان در زمان پرواز الهام گرفته‌اند (Eberhart & Kennedy, 1995).

در الگوریتم PSO، 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. نتیجه‌ی مدل‌سازی این رفتار اجتماعی فرایند جستجویی است که ذرات به سمت نواحی موفق میل می‌کنند. ذرات از یکدیگر

در هر مرحله از اجرای مدل تلفیقی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی، متغیرهای تصمیم توسط الگوریتم بهینه‌سازی تعیین شده و به عنوان ورودی به مدل شبیه‌سازی (مدل جایگزین) داده می‌شود. در نهایت پس از دریافت خروجی مدل شبیه‌سازی که غلظت اکسیژن محلول زیرلایه است، تابع هدف مدل محاسبه می‌گردد. در این مطالعه هدف از مدل توسعه داده شده، کاهش غلظت مواد مغذی در لایه‌های پایین مخزن و به حداکثر رساندن غلظت اکسیژن محلول است. بر اساس چارچوب مدل بهینه‌سازی و با توجه به مشخصات مخزن سیمره (دو خروجی در دو تراز مختلف)، ساختار به دست آمده از مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی به شرح زیر است:

### • تابع هدف

$$\text{Maximize } Z = \text{Min} C_{2,t} \quad (۱)$$

### • محدودیت‌ها

$$R_t = \sum_{k=1}^K r_{k,t}, \quad t = 1, \dots, 12 \quad (۲)$$

$$C_{k,t} = \text{net}(r_{k,t}), \quad t = 1, \dots, 12 \quad (۳)$$

$$S_{t+1} = S_t + I_{t+1} - R_t - \text{Loss}_t, \quad t = 1, \dots, 12 \quad (۴)$$

$$S_{\min} < S_t < S_{\max}, \quad t = 1, \dots, 12 \quad (۵)$$

$$0 \leq r_{k,t} < r_{k,\max}, \quad t = 1, \dots, 12 \quad (۶)$$

$$C_{k,t} = f(T_{\text{air},t}, C_{\text{in},t}, I_t, T_{\text{in},t}, r_{k,t}, S_c) \\ , t = 1, \dots, 12 \quad (۷)$$

$$\bar{C}_t = \sum_{k=1}^K (r_{k,t} \times C_{k,t}) / R_t, \quad t = 1, \dots, 12 \quad (۸)$$

$$\bar{C}_t > C_{\text{standard}}, \quad t = 1, \dots, 12 \quad (۹)$$

$$R_t > D_t, \quad t = 1, \dots, 12 \quad (۱۰)$$

در معادلات بالا،  $S_t$  مقدار حجم ذخیره مخزن در ماه  $t$ ،  $I_t$  مقدار ورودی به مخزن در ماه  $t$ ،  $R_t$  مقدار کل رهاسازی از مخزن در ماه  $t$ ،  $\text{Loss}_t$  مقدار تلفات در مخزن در ماه  $t$ ،  $S_{\min}$  مقدار حداقل حجم ذخیره مخزن،  $S_{\max}$  مقدار حداکثر حجم ذخیره مخزن،  $k$  تعداد خروجی‌های مخزن،  $\Gamma_{k,\text{Max}}$  حداکثر ظرفیت خروجی،  $\Gamma_{k,t}$  رهاسازی از خروجی  $k$  در ماه  $t$ ،  $C_{k,t}$  غلظت پارامتر کیفی مورد نظر در خروجی  $k$  و در ماه  $t$ ،  $T_{\text{air},t}$  دمای هوا در محل مخزن،  $C_{\text{in},t}$  غلظت پارامتر کیفی ورودی به مخزن،  $T_{\text{in},t}$  دمای آب جریان ورودی به مخزن،  $S_c$  ضریب تغییر پارامتر کیفی، میانگین غلظت پارامتر کیفی در ماه  $t$ ،  $C_{\text{standard}}$  حداقل غلظت اکسیژن محلول لازم برای پایین دست،  $D_t$  نیاز پایین دست در

کارلسون<sup>۴</sup>، والن واید<sup>۵</sup>، شاخص ارائه شده توسط آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (USEPA)<sup>۶</sup> و غیره ارائه شده است. در این مطالعه از شاخص ارائه شده توسط USEPA استفاده شده است.

پس از شبیه‌سازی کیفی مخزن، جهت پایش و بررسی وضعیت تغذیه‌گرایی مخزن و ارزیابی میزان تأثیر روش‌های بهبود کیفی در مخزن، می‌توان پارامترهای شاخص کیفی را اندازه‌گیری کرد. براساس میزان حضور مواد مغذی و رشد جلبک‌ها در مخزن، وضعیت تغذیه‌گرایی معمولاً در سه سطح تغذیه‌گرایی زیاد<sup>۷</sup>، تغذیه‌گرایی متوسط<sup>۸</sup> و تغذیه‌گرایی کم<sup>۹</sup> دسته‌بندی می‌شود. برای تشخیص درجه تغذیه‌گرایی یک پیکره آبی، می‌توان براساس علائم و آثار ناشی از تغذیه‌گرایی شاخص‌هایی را تعریف کرد. آثار ناشی از تغذیه‌گرایی و تغییرات کیفی مخزن را می‌توان به وسیله اندازه‌گیری پارامترهایی نظیر اکسیژن زیرلایه<sup>۱۰</sup>، فسفر کل<sup>۱۱</sup>، نیتروژن کل<sup>۱۲</sup>، عمق سکی<sup>۱۳</sup>، کلروفیل A<sup>۱۴</sup> و غیره تعیین کرد. با توجه به پیچیدگی فرآیندهای کیفی و تغذیه‌گرایی، تعریف شاخص‌های ارزیابی وضعیت تغذیه‌گرایی با قطعیت کامل امکان‌پذیر نیست و یک روش واحد کاملاً دقیق در این زمینه وجود ندارد و مرز واضح و مشخصی بین درجات مختلف تغذیه‌گرایی وجود ندارد.

در سال ۱۹۹۹، شاخصی برای ارزیابی تغذیه‌گرایی مخزن توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (USEPA) پیشنهاد شده است. این شاخص که با شاخص تغذیه‌گرایی نووتنی<sup>۱۵</sup> نیز سازگار است با استفاده از ۴ پارامتر عمق سکی، کلروفیل A و فسفر کل و همچنین اکسیژن زیرلایه (درصد اشباع) اقدام به دسته‌بندی مخازن از نظر تغذیه‌گرایی نموده است که به وسیله آن‌ها می‌توان میزان مغذی بودن مخزن را تعیین کرد (USEPA, 1999). جدول ۱ نمایش‌دهنده دسته‌بندی مخازن از نظر تغذیه‌گرایی توسط شاخص USEPA می‌باشد.

**Table 1- Trophic status classification via USEPA index (1999)**  
**جدول ۱- وضعیت تغذیه‌گرایی براساس شاخص USEPA (USEPA, 1999)**

Water Quality Parameters	Trophic status		
	Oligotrophic	Mesotrophic	Eutrophic
فسفر کل (mg/lit)	<10	10 - 20	>20
Total Phosphorus			
کلروفیل a (mg/lit)	<4	4 - 10	>10
Chlorophyll a			
عمق سکی (m)	4	2 - 4	<2
Secchi depth			
اکسیژن زیرلایه (درصد اشباع)	>80	10 - 80	<10
Hypolimnion dissolved oxygen (% saturation)			

می‌آموزند و بر مبنای دانش بدست آمده به سمت بهترین همسایگان خود می‌روند اساس کار PSO 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.

در این پژوهش با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی، سعی در یافتن حالت بهینه خروجی از دریچه‌های مخزن شده است. بدین منظور مدل بهینه‌سازی توسعه داده شد که در آن تابع هدف، حداکثر کردن مقدار غلظت اکسیژن محلول خروجی از دریچه تحتانی مخزن است.

## ۲-۶- شاخص‌های تغذیه‌گرایی

هدف اصلی این مقاله، رهاسازی آب از دریچه زیرین مخزن جهت خروج مواد مغذی انباشته شده از مخزن است. این کار سبب افزایش کیفیت آب در مخزن شده و سبب بهبود وضعیت تغذیه‌گرایی در مخزن می‌شود.

غلظت اکسیژن محلول (DO<sup>۱۶</sup>) یک شاخص عمومی از سلامت زیست‌بوم آبی است. اکسیژن محلول به طور مرتب در مطالعات مرتبط با تغذیه‌گرایی مورد اندازه‌گیری و پایش قرار می‌گیرد. این اندازه‌گیری‌ها برای توصیف وضعیت اکسیژن محلول در آب، تعیین حضور یا عدم حضور اکسیژن در رسوبات، تعداد روزهای وقوع شرایط بی‌هوازی و اینکه آیا دریاچه زیستگاه مناسبی برای گونه‌های حساس ماهی است یا خیر، صورت می‌گیرد. شرایط بی‌هوازی در دریاچه‌ها ممکن است به رشد جلبک‌های سبز-آبی کمک کند. فقدان اکسیژن در لایه‌های زیرین باعث آزاد شدن فسفر غیر معدنی، آمونیاک و سولفید هیدروژن از رسوبات می‌شود (Loucks and Van Beek, 2005). برای ارزیابی شرایط تغذیه‌گرایی در مخزن، شاخص‌های مختلفی مانند شاخص‌های

### ۳- نتایج و تحلیل نتایج

از روش RMSE داده‌های اصلی و داده‌های حاصل از شبکه عصبی برای هر دو دریچه محاسبه شده است.

در شکل ۹، سری زمانی غلظت اکسیژن محلول بدست آمده از شبکه عصبی در مقایسه با مقادیر حاصل از مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2، برای یک سری از داده‌ها، نمایش داده شده است. ضریب همبستگی میان داده‌های حاصل از مدل شبیه‌سازی و نتایج حاصل از مدل جایگزین (شبکه عصبی) برای هر دو دریچه، حدود ۰/۹۸ است. پس از آموزش شبکه عصبی مصنوعی، ۱۰ درصد از داده‌ها برای صحت‌سنجی مدل حاصل استفاده شدند. شکل ۱۰ نتایج مربوط به صحت‌سنجی شبکه عصبی آموزش داده شده برای دریچه‌های مخزن را نمایش می‌دهد.

براساس تابع هدف و قیود بیان شده، مدل بهینه‌سازی جهت تعیین بهترین حالت ممکن برای خروجی از دریچه‌ها که کیفیت مناسبی داشته باشد اجرا شده است. با توجه به نتایج حاصله، در سیاست بهینه بدست آمده جریان خروجی از دریچه زیرین افزایش یافته است. این امر سبب تخلیه لایه‌های زیرین دریاچه و خروج بخش زیادی از مواد مغذی ته‌نشین شده در مخزن می‌شود.

با توجه به هدف تعریف شده در این کار تحقیقاتی، که تعیین مقدار بهینه رهاسازی از دریچه تحتانی مخزن است، جهت تعیین رابطه‌ی بین دبی و پارامتر کیفی اکسیژن محلول برای هر دریچه، ۵۰ سناریوی مختلف بهره‌برداری از مخزن با رویکرد برداشت انتخابی به صورت تصادفی برای مدل CE-QUAL-W2 در بازه زمانی ۲ ساله، تعریف گردیده است. از این تعداد ۳۰ سناریو جهت آموزش شبکه عصبی بکار گرفته شده است. ۱۰ سناریو برای تست شبکه بکارگیری شده است و ۱۰ سناریو نیز برای صحت‌سنجی شبکه عصبی استفاده شده است. غلظت اکسیژن محلول متناظر هر دبی شبیه‌سازی شده توسط مدل CE-QUAL-W2 به عنوان خروجی مورد نظر از مدل مبتنی بر داده شبکه عصبی است. جهت تعیین بهترین معماری شبکه عصبی، آنالیز حساسیت بر روی توابع انتقال، تعداد لایه‌ها و تعداد نرون‌ها صورت گرفته است. به این منظور تعداد نرون‌های شبکه عصبی در بازه بین ۱ تا ۸۰ تغییر یافته و توابع انتقال مختلف نیز در معماری شبکه بکار گرفته شده است. با بررسی میزان خطای شبکه عصبی در شرایط مختلف، موارد بیان شده در جدول ۲ به عنوان بهترین معماری شبکه انتخاب گردیده است. همچنین میزان خطای شبکه عصبی با استفاده

Table 2- Best of Neural Network Architecture for each gate

جدول ۲- بهترین معماری شبکه عصبی برای هر دریچه

Num. Gate	Transfer Function	Layer	Neuron	RMSE Train	RMSE Test
Upper Gate	Tansig-Tansig	1	14	0.0046	0.0136
Lower Gate	Tansig-Tansig	1	14	0.0048	0.0132

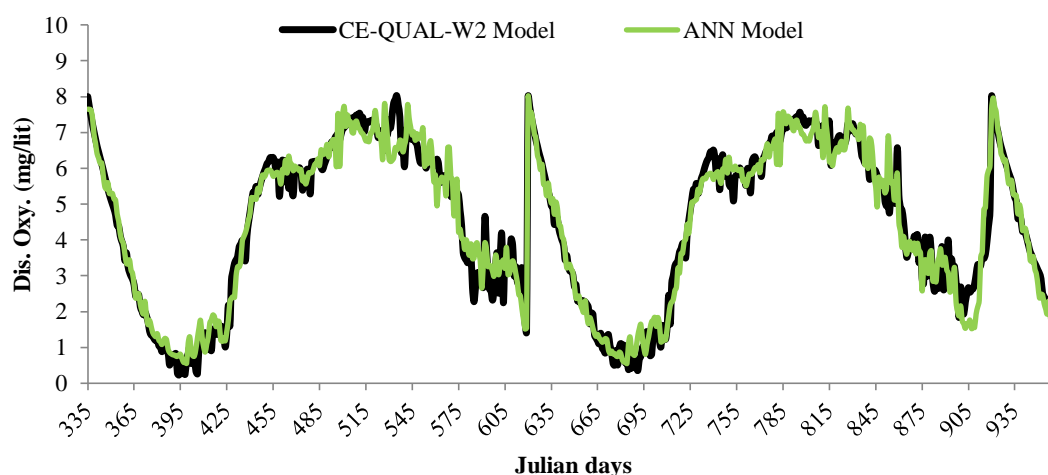


Fig. 9- Comparing the performance of neural network model with CE-QUAL-W2

شکل ۹- مقایسه عملکرد مدل شبکه عصبی و مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2

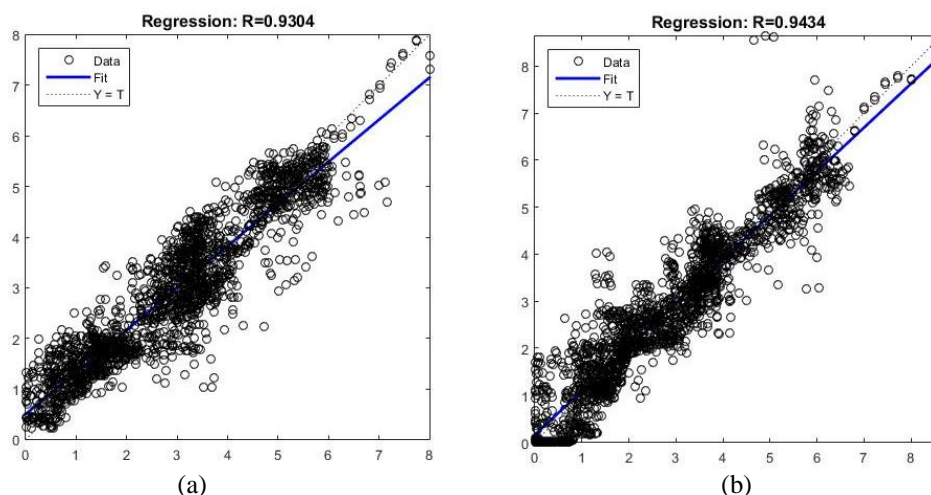


Fig. 10- Verification results of ANN model (a) Upper gate; (b) Lower gate;

شکل ۱۰- نتایج صحت‌سنجی مدل شبکه عصبی توسعه داده شده؛ (a) دریچه فوقانی؛ (b) دریچه تحتانی

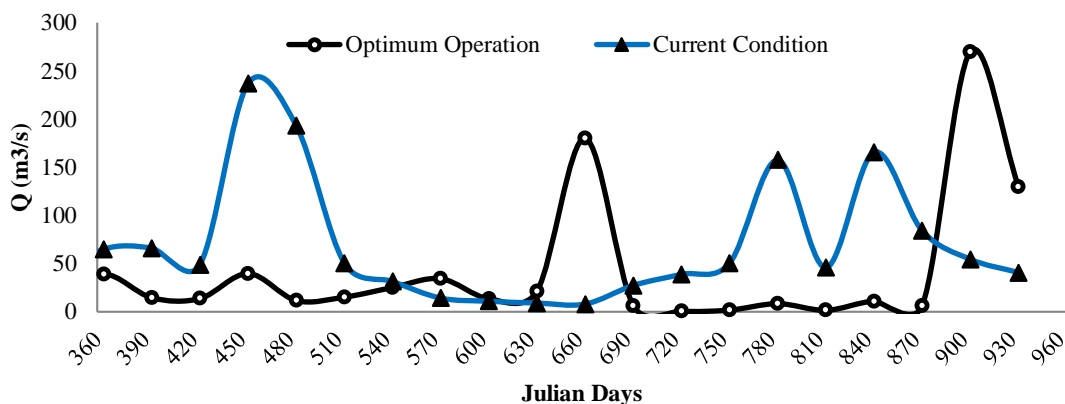


Fig. 11- Release from gate 1 for current policy and optimal solution

شکل ۱۱- مقایسه جریان خروجی از دریچه بالایی مخزن به ازای جواب بهینه و سیاست بهره‌برداری موجود

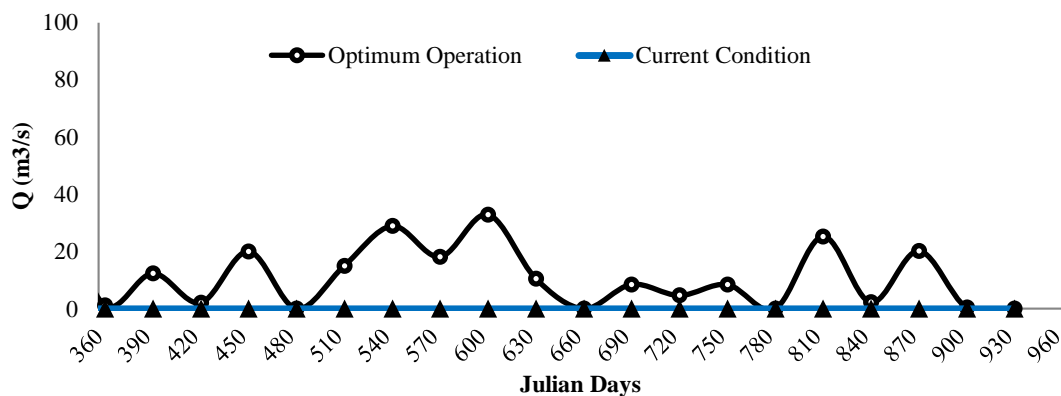


Fig. 12- Release from gate 2 for current policy and optimal solution

شکل ۱۲- مقایسه جریان خروجی از دریچه زیرین مخزن به ازای جواب بهینه و سیاست بهره‌برداری موجود

اکسیژن محلول در سیاست بهینه نسبت به سیاست موجود افزایش داشته است. این مقدار افزایش بسته به ماه‌های مختلف متفاوت است و در بعضی از ماه‌ها تا ۵۰ درصد هم می‌رسد.

همانطور که در شکل ۱۴ قابل مشاهده است تخلیه آب از زیرلایه در سال دوم اجرا نسبت به سال اول بهبود بیشتری در میزان غلظت اکسیژن محلول نشان می‌دهد. این امر نشان‌دهنده اثرگذاری تخلیه آب از زیر لایه در طولانی مدت است و چنانچه این روش برای مدت چند سال اجرا شود می‌تواند بهبود قابل ملاحظه‌ای در وضعیت کیفی مخزن ایجاد کند. شکل ۱۵ میزان بهبود اکسیژن محلول خروجی از مخزن را در طول دوره شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود این میزان بهبود در بعضی از ماه‌ها منجر به ۲ برابر شدن غلظت اکسیژن محلول شده است. همچنین نتایج نشان‌دهنده بهبود بیشتر کیفیت در سال دوم اجرای مدل است که نشان می‌دهد با اعمال سیاست بهره‌برداری بهینه در طولانی مدت اثرات تخلیه از زیرلایه خود را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۱۱، مقدار رهاسازی از دریچه بالایی مخزن در حالت بهینه نسبت به سیاست موجود مقداری کاهش یافته است. این کاهش به دلیل افزایش رهاسازی از دریچه زیرین مخزن با هدف خروج مواد مغذی می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۲ قابل مشاهده است مقدار رهاسازی از دریچه زیرین در سیاست بهره‌برداری موجود در همه ماه‌ها صفر است و تمام رهاسازی از دریچه بالایی صورت می‌گیرد ولی در سیاست بهینه مقدار رهاسازی از دریچه تحتانی مخزن افزایش یافته است.

به منظور ارزیابی جواب‌های بدست آمده از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با تکنیک مدل جایگزین، درستی و صحت تابع هدف کیفی با مدل عددی CE-QUAL-W2 کنترل گردیده است و مدل شبیه‌سازی مخزن به‌ازای نتایج حاصل از بهینه‌سازی، اجرا شده است. شکل ۱۳ و ۱۴، مقادیر اکسیژن محلول جریان خروجی از دریچه‌های مخزن را به ازای سیاست موجود و بهینه در ماه‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در دریچه زیرین مقدار غلظت

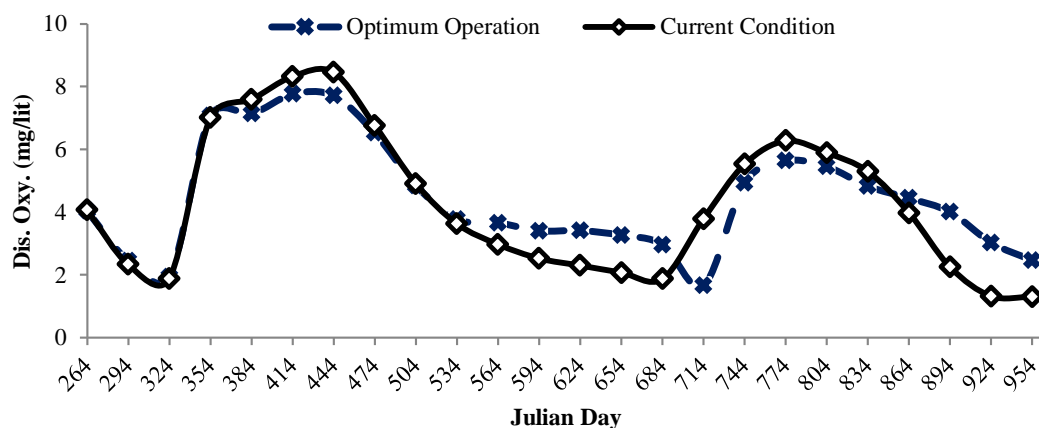


Fig. 13- Dissolved oxygen concentration in gate 1 outflow for current policy and optimal solution  
 شکل ۱۳- مقدار اکسیژن محلول جریان خروجی از دریچه بالایی مخزن به ازای سیاست بهینه و شرایط موجود

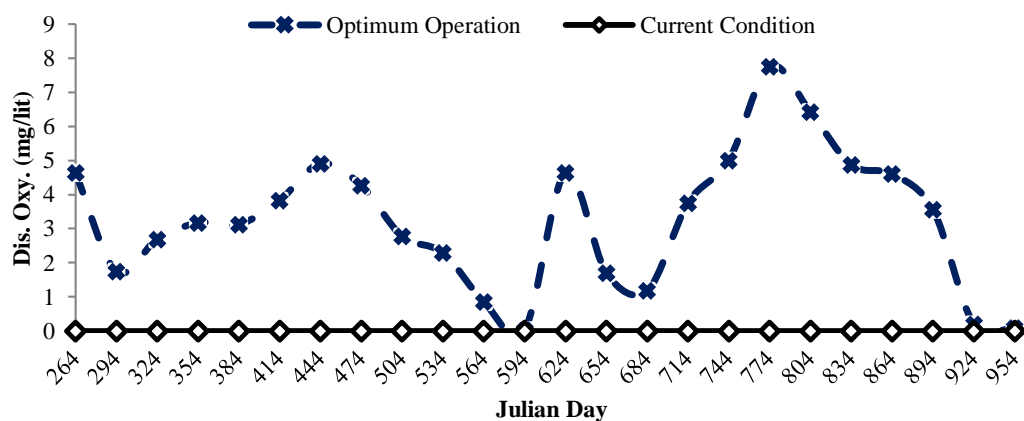
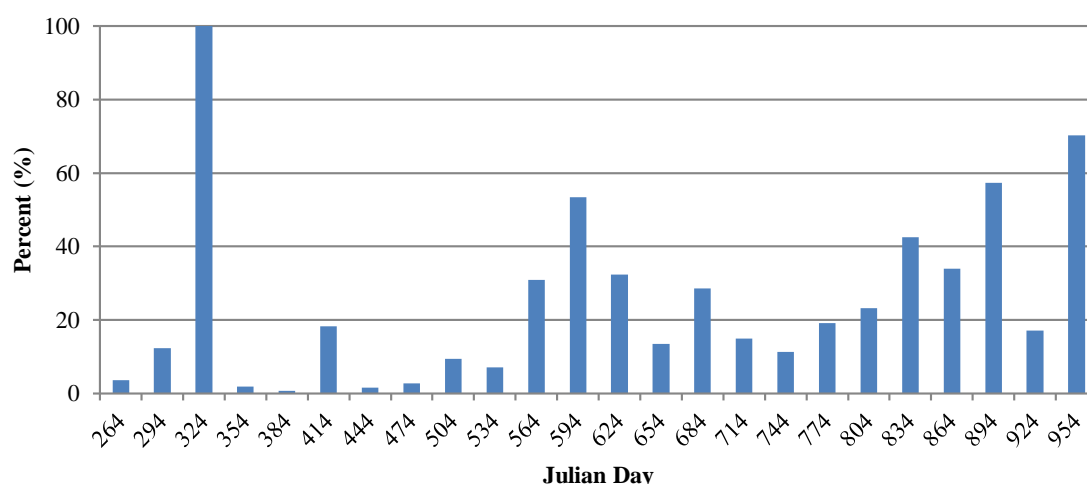


Fig. 14- Dissolved oxygen concentration in gate 2 outflow for current policy and optimal solution  
 شکل ۱۴- مقدار اکسیژن محلول جریان خروجی از دریچه زیرین مخزن به ازای سیاست بهینه و شرایط موجود



**Fig. 15- Improved concentration of dissolved oxygen in the reservoir outflow**  
 شکل ۱۵- میزان بهبود اکسیژن محلول خروجی از مخزن

در جدول ۳، وضعیت تغذیه‌گرایی کم با حرف O (Oligotrophic)، تغذیه‌گرایی متوسط با حرف M (Mesotrophic)، تغذیه‌گرایی شدید با حرف E (Eutrophic) نمایش داده شده است.

### ۳-۲- رقوم سطح آب مخزن

در شکل ۱۶، رقوم سطح آب مخزن در ماه‌های مختلف نمایش داده شده است. با توجه به نتایج شاهد افزایش تراز آب مخزن در شرایط اعمال سیاست بهینه بهره‌برداری هستیم البته این موضوع بستگی به شرایط خشک‌سالی یا ترسالی نیز دارد و ممکن است در شرایط خشک‌سالی اتفاق نیفتد. همانگونه که مشاهده می‌شود در ماه می با توجه افزایش مقدار ورودی به مخزن در ماه‌های مارچ و آپریل، حجم ذخیره آب در مخزن افزایش یافته است. با توجه به کاهش ورودی آب در ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست و همچنین افزایش نیاز پایین دست در این ماه‌ها در سپتامبر و اکتبر شاهد کاهش قابل ملاحظه حجم آب ذخیره‌شده در مخزن هستیم.

### ۳-۱- وضعیت تغذیه‌گرایی مخزن

هدف اصلی این مقاله، رهاسازی آب از دریچه زیرین مخزن جهت خروج مواد مغذی انباشته شده از مخزن است. این کار سبب افزایش کیفیت آب در مخزن شده و سبب بهبود وضعیت تغذیه‌گرایی در مخزن می‌شود. جهت بررسی وضعیت تغذیه‌گرایی مخزن، از شاخص کارلسون استفاده شده است. برای این کار با استفاده از مقادیر فسفر کل و نیتروژن کل و محاسبه شاخص تغذیه‌گرایی  $TSI^{16}$ ، وضعیت مخزن از نظر مغذی بودن ارزیابی گردیده است. براساس نتایج به دست آمده در وضعیت بهره‌برداری کنونی از مخزن، مخزن در وضعیت تغذیه‌گرایی متوسط و در ماه‌های تیر و مرداد در وضعیت تغذیه‌گرایی شدید قرار دارد. با اعمال سیاست بهینه بهره‌برداری وضعیت مخزن در اکثر ماه‌ها در وضعیت الیگوتروفیک (تغذیه‌گرایی کم) و یا مزوتروفیک (تغذیه‌گرایی متوسط) قرار می‌گیرد که نشان از مؤثر بودن تخلیه آب از زیر لایه در این مخزن است. جدول ۳ میزان تغذیه‌گرایی مخزن در ماه‌های مختلف را براساس شرایط موجود مخزن و بکارگیری شاخص USEPA نشان می‌دهد.

**Table 3- Eutrophication status based on USEPA index (USEPA 1999)**  
 جدول ۳- وضعیت تغذیه‌گرایی براساس شاخص USEPA (USEPA, 1999)

	Month											
	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.
Current condition	E	E	E Or M	E Or M	M	M	M	E Or M	E	E	E	E
Optimum operation	M	E Or M	M	M	O	M	M	M	M	M	E	E

مدیریت کیفیت مخزن در قالب بهره‌برداری با روش برداشت انتخابی مورد بررسی قرار گرفته است. رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی جهت تعیین مقدار رهاسازی آب از دریچه‌های مخزن با هدف بهبود کیفیت جریان آب خروجی مخزن (غلظت اکسیژن محلول) در حل این مسأله مورد استفاده قرار گرفته است. الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات، مدل شبیه‌سازی کیفیت آب CE-QUAL-W2 و شبکه عصبی مصنوعی از ابزارهای مورد استفاده در این تحقیق هستند. در این مطالعه، تدوین سیاست بهره‌برداری از مخزن در قالب برداشت انتخابی از دریچه‌ها با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی توسعه داده شده انجام گرفته است.

شکل ۱۷ مقادیر نیاز و رهاسازی از مخزن را به ازای هر ماه نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با توجه به وجود قید تأمین نیاز در هر ماه در مدل توسعه یافته در تمامی ماه‌ها مقدار رهاسازی بزرگتر مساوی با مقدار نیاز است.

#### ۴- جمع‌بندی

به سبب افزایش میزان ورود آلاینده‌ها شاهد وقوع پدیده تغذیه‌گرایی در مخازن و دریاچه‌ها هستیم. جهت بهبود کیفیت آب مخزن می‌توان از راهکارهایی مانند برداشت انتخابی، تخلیه آب از زیر لایه و همچنین بهینه‌سازی کیفیت آب خروجی از مخزن استفاده کرد. در این مطالعه

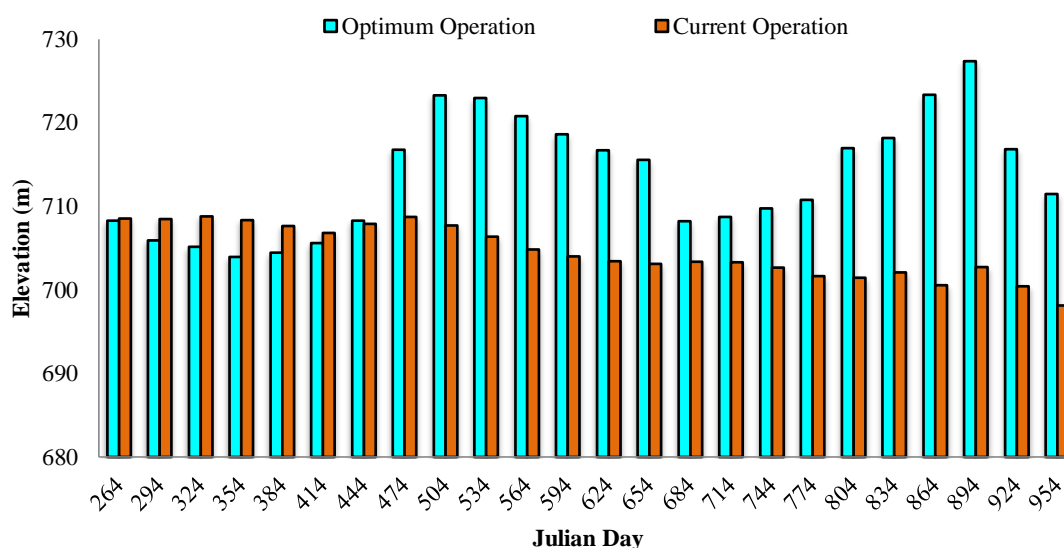


Fig. 16- Reservoir water level during simulation for current condition and optimal policy

شکل ۱۶- رقوم سطح آب مخزن در طول دوره شبیه‌سازی به ازای شرایط موجود و سیاست بهینه

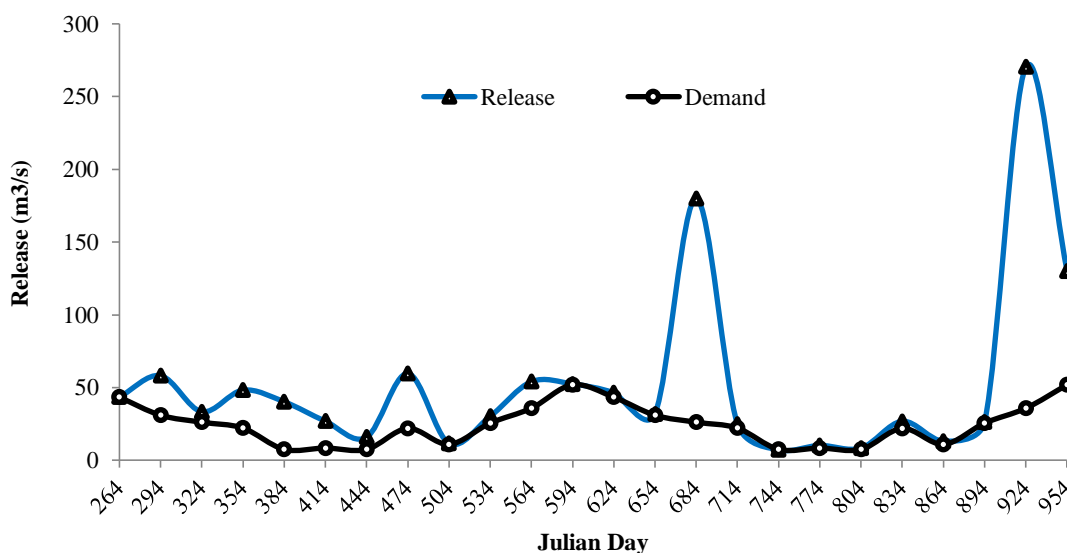


Fig. 17- Comparison of demand and release values per month

شکل ۱۷- مقایسه مقادیر نیاز و رهاسازی در هر ماه

- approach. Iran-Water Resources Research 7(3):13-26 (In Persian)
- Araghinejad S (2014) Data-driven modeling: Using MATLAB® in water resources and environmental engineering. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/978-94-007-7506-0>
- Castelletti A, Yajima H, Giuliani M, Soncini-Sessa R, and Weber E (2014) 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, Available at: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29WR.1943-5452.0000348>
- Chaves P and Kojiri T (2007) Deriving reservoir operational strategies considering water quantity and quality objectives by stochastic fuzzy neural networks. Advances in Water Resources 30(5):1329-1341
- Chaves P, Tsukatani T, and Kojiri T (2004) Operation of storage reservoir for water quality by using optimization and artificial intelligence techniques. Mathematics and Computers in Simulation 67(4-5):419-432
- Cole T and Wells SA (2015) CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, Version 3.75. User Manual. Department of Civil and Environmental Engineering Portland State University Portland, OR (March)
- Deus R, Brito D, Mateus M, Kenov I, Fornaro A, Neves R, and Alves CN (2013) Impact evaluation of a pisciculture in the Tucuruí reservoir (Pará, Brazil) using a two-dimensional water quality model. Journal of Hydrology 487:1-12, Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.022>
- Dhar A, Datta B (2008) Optimal operation of reservoirs for downstream water quality control using linked simulation optimization. Hydrological Processes 22(6):842-853
- Eberhart R, Kennedy J (1995) Particle swarm optimization. Proceeding of IEEE International Conference on Neural Network Perth Australia 1942-1948
- Fayaed SS, El-Shafie A, and Jaafar O (2013) Reservoir-system simulation and optimization techniques. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 27(7):1751-1772
- Fontana L, Albuquerque ALS, Brenner M, Bonotto DM, Sabaris TPP, Pires MAF, Cotrim MEB, and Bicudo DC (2014) The eutrophication history of a tropical water supply reservoir in Brazil. Journal of Paleolimnology 51(1):29-43
- عملکرد روش توسعه داده شده در این تحقیق، برای یک دوره شبیه‌سازی ۲ ساله روی مخزن سد سیمره ارزیابی شده است. مقادیر غلظت اکسیژن محلول آب خروجی از مخزن در حالت سیاست بهینه با بهره‌برداری کنونی مخزن، مقایسه گردیده است. نتایج حاصل، حاکی از افزایش ۲۵ درصدی میانگین غلظت اکسیژن محلول خروجی از مخزن در حالت اعمال سیاست بهره‌برداری بهینه است که نشان دهنده کارایی مطلوب روش پیشنهادی در این مطالعه می‌باشد.
- از پژوهش‌های پیشنهادی در ادامه این کار تحقیقاتی می‌توان به در نظر گرفتن اهداف کمی و کیفی، کنترل پارامترهای کیفی مؤثر دیگر، تدوین دستورالعمل بهینه بهره‌برداری از مخزن در قالب اهداف کمی و کیفی، تدوین توأم دستورالعمل بهره‌برداری از مخزن در ساختار برداشت انتخابی و حذف آلاینده‌های نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای در حوضه آبریز بالادست اشاره کرد.

#### پی‌نوشت‌ها

- 1- A Library for Support Vector Machines
- 2- Artificial Neural Network
- 3- Dissolved Oxygen
- 4- Carlson's Index
- 5- Vollenweider's Index
- 6- United States Environmental Protection Agency
- 7- Eutrophic
- 8- Mesotrophic
- 9- Oligotrophic
- 10- Dissolved Oxygen
- 11- Total Phosphorus
- 12- Total Nitrogen
- 13- Secchi Depth
- 14- Chlorophyll a
- 15- Novotny's Index
- 16- Trophic State Index

#### ۵- مراجع

- Afshar A, Saadatpour M (2009) Reservoir eutrophication modeling, sensitivity, analysis and assessment: application to Karkheh reservoir, Iran. Environmental Engineering Science 26(7):1227-1238
- Ahmad A, El-Shafie A, Mohd Razali SF, and Mohamad ZS (2014) Reservoir optimization in water resources: A review. Water Resources Management 28(11):3391-3405
- Taheriyoun M, Karamouz M, and Baghvand A (2011) Development of a phosphorous management model for a reservoir using system dynamic simulation



- Oliás M, Nieto JM, Sarmiento AM, Cánovas CR, and Galván L (2010) Water quality in the future alcolea reservoir (Odiel River, SW Spain): A clear example of the inappropriate management of water resources in Spain. *Water Resources Management* 25(1):201-215
- Rangel-Peraza JG, De Anda J, Gonzalez-Farias FA, and Rode M (2016) Sensitivity and uncertainty analysis on water quality modelling of Aguamilpa reservoir. *Journal of Limnology* 75:81-92
- Rani D and Moreira MM (2010) Simulation-optimization modeling: A survey and potential application in reservoir systems operation. *Water Resources Management* 24(6):1107-1138
- Saadatpour M, Afshar A, and Edinger JE (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
- Saadatpour M and Heravi A (2016) Study of environmental performance criteria in Karkheh reservoir with enhanced model of CE-QUAL-W2 (V3.72). *Iran-Water Resources Research* 12(3):50-64 (In Persian)
- Sadeghian A, de Boer D, Hudson JJ, Wheeler H, and Lindenschmidt KE (2015) Lake dieffenbaker temperature model. *Journal of Great Lakes Research*, International Association for Great Lakes Research 41:8-21, Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jglr.2015.10.002>
- Soleimani S, Bozorg-Haddad O, Saadatpour M, and Loáiciga HA (2016) Optimal selective withdrawal rules using a coupled data mining model and genetic algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management* 142(12):1-9
- Wang L, Liu L, and Zheng B (2013) Eutrophication development and its key regulating factors in a water-supply reservoir in North China. *Journal of Environmental Sciences (China)*, The Research Centre for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences 25(5):962-970, Available at: [http://dx.doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60120-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60120-X)
- Xu MJ, Yu L, Zhao YW, and Li M (2012) The simulation of shallow reservoir eutrophication based on MIKE21: A case study of douhe reservoir in north China. *Procedia Environmental Sciences* 13(2011):1975-1988, Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1878029612001922>
- Gelda RK and Effler SW (2007) Simulation of operations and water quality performance of reservoir multilevel intake configurations. *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce* 133(1):78-86
- Giuliani M, Castelletti A, Galelli S, Soncini-Sessa R and Weber E (2013) Many-objective operation of selective withdrawal reservoirs including water quality targets. *World Environmental and Water Resources Congress 2013: Showcasing the Future-Proceedings of the 2013 Congress* 1581-1590
- Javaheri S and Saadatpour M (2017) Deriving hydropower reservoir operation rules in selective withdrawal framework considering quality and quantity objectives; simulation-optimization approach based on meta-modelling. *Iran-Water Resources Research* 13(3):128-142 (In Persian)
- Karadžić V, Subakov-Simić G, Krizmanić J, and Natić D (2010) Phytoplankton and eutrophication development in the water supply reservoirs Garaši and Bukulja (Serbia). *Desalination* 255(1-3):91-96
- Karmakar S, Haque SMS, Hossain MM, and Shafiq M (2011) Water quality of Kaptai reservoir in Chittagong Hill Tracts of Bangladesh. *Journal of Forestry Research* 22(1):87-92
- Kerachian R and Karamouz M (2006) Optimal reservoir operation considering the water quality issues: A stochastic conflict resolution approach. *Water Resources Research* 42(12)
- Kerachian R and Karamouz M (2007) A stochastic conflict resolution model for water quality management in reservoir-river systems. *Advances in Water Resources* 30(4):866-882
- Kuo JT, Lung WS, Yang CP, Liu WC, Yang M Der, and Tang TS (2006) Eutrophication modelling of reservoirs in Taiwan. *Environmental Modelling and Software* 21(6):829-844
- Moridi A (2018) Dealing with reservoir eutrophication in a trans-boundary river. *International Journal of Environmental Science and Technology* Springer Berlin Heidelberg (2008), Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s13762-018-1775-y>
- Moridi A and Yazdi J (2017) Sediment flushing of reservoirs under environmental considerations. *Water Resources Management* 31(6):1899-1914
- Ndiritu JG (2003) Reservoir system optimisation using a penalty approach and a multi-population genetic algorithm. *Water SA* 29(3):273-280