

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و چهارم، شماره سه، خرداد ماه ۱۴۰۱ (۸۴-۷۱)

برنامه‌ریزی چندهدفه به منظور مدیریت اثرات کمی و کیفی بهره‌برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی دشت شهریار

نیما صالحی شفا^۱

حسین بابازاده^{۲*}

h_babazadeh@hotmail.com

فیاض آقاییاری^۳

علی صارمی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۷/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۹

چکیده

زمینه و هدف: با توسعه کشاورزی، صنعت و رشد جمعیت، بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی افزایش یافته و کمیت، کیفیت آن را نیز تحت تأثیر قرار داده است. مدیریت بهره‌برداری بهینه آب زیرزمینی برای جلوگیری از بروز مشکلات کمی و کیفی آبخوان‌ها ضروری می‌باشد. هدف از این تحقیق، بهره‌برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی و بررسی اثرات کمی و کیفی آن بر آبخوان دشت شهریار است. روش بررسی: تغییرات سطح آب زیرزمینی و کیفیت آن از منظر شاخص TDS در آبخوان دشت شهریار در بازه زمانی سال آبی ۹۳ تا ۹۵، توسط شبکه عصبی مصنوعی شبیه‌سازی شده‌اند. سپس TDS آب زیرزمینی توسط رگرسیون برآورد شده است. و در نهایت از الگوریتم ژنتیک چند هدفه (NSGA-II) به منظور بهره‌برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی و با هدف حداقل نمودن تغییرات سطح آب زیرزمینی و کل مواد جامد محلول آب زیرزمینی، استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد، معیار ارزیابی RMSE در سه وضعیت آموزش، آزمایش و صحت‌سنجی برای تغییرات سطح آب زیرزمینی به ترتیب برابر ۰/۰۰۲۵، ۱/۲۷e-۰۶ و ۰/۰۰۳ و برای کل مواد جامد محلول آب زیرزمینی برابر ۰/۲۴، ۲۷/۶۴ و ۱۴/۶۰۸ می‌باشد و معیار ضریب همبستگی (R) در سطح ۰/۰۵ در سه وضعیت برای هر دو متغیر معنی‌دار بود. همچنین در بازه زمانی مورد مطالعه، حجم برداشت

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- استاد، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. * (مسئول مکاتبات)

۳- استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.

۴- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

بهینه از آبخوان به میزان ۲۹/۱۲ درصد کاهش یافته و مقدار بهینه TDS آب زیرزمینی به‌طور میانگین، به اندازه ۱۲۰/۸۷ میلی‌گرم بر لیتر کمتر از برآورد شبکه عصبی مصنوعی است. و سطح آب زیرزمینی نیز به‌طور میانگین به اندازه ۹/۲۷ متر در سال افزایش یافته است.

بحث و نتیجه‌گیری: نتایج حاصل نتایج نشان داد که روش شبیه‌سازی-بهینه‌سازی پیشنهادی به‌عنوان یک ابزار کاربردی با عملکرد مناسب و کم هزینه و با سرعت مطلوب می‌تواند با سیاست بهره‌برداری بهینه همزمان از چند عامل مؤثر پشتیبانی کند. همچنین مشکلات کمی و کیفی آبخوان را کاهش داده و باعث افزایش پایداری سیستم آب زیرزمینی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: منابع آب زیرزمینی، تغییرات سطح آب زیرزمینی، TDS، بهره‌برداری بهینه، پایداری سیستم آب زیرزمینی.

Multi-objective planning in order to manage the quantitative and qualitative effects of optimal utilization of groundwater resources in Shahriar plain

Nima Salehi Shafa¹

Hossein Babazadeh^{2*}

h_babazadeh@hotmail.com

Fayyaz Aghayari³

Ali Saremi⁴

Admission Date: January 19, 2022

Date Received: October 2, 2021

Abstract

Background and Objective: Development of agriculture, industry and population growth, the exploitation of groundwater resources has increased and has affected its quality. In order to prevent the occurrence of quantitative and qualitative problems of aquifers, management of optimal operation of groundwater resources is essential. Therefore, the purpose of this study is the optimal utilization of groundwater resources and to investigate its quantitative and qualitative effects on the Shahriar plain aquifer.

Material and Methodology: Groundwater level changes and its quality from the perspective of index (TDS) in Shahriar plain aquifer have been simulated by ANN. Then (TDS) of groundwater has estimated by regression. Finally, the multi-objective genetic algorithm (NSGA-II) was used for optimal utilization of groundwater resources and with the aim of minimizing groundwater level changes and total dissolved solids of groundwater.

Findings: According to the results of the study, the evaluation criteria (RMSE) in three modes of training, testing and validation for groundwater level changes are equal to $1.27e-06$, 0.0025 and 0.003, respectively, and for total dissolved solids of groundwater was calculated to be 0.24, 27.64 and 14.608 and the correlation coefficient (R) at the level (0.05) in three situations was significant for both variables. Also, during the study period, the volume of optimal withdrawal from the aquifer has decreased by 29.12 percent and the optimal amount (TDS) of groundwater on average, 120.87 Mg./l, has been calculated less than the estimate of artificial neural network. And Groundwater level has also increased by an average of 9.27 meters per year.

1- PhD Candidate of Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Professor, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran *(Corresponding Author)

3- Assistant Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran, Iran

4- Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Discussion and Conclusion: The results confirm that the proposed simulation-optimization method as an application tool with good performance, low cost and desirable speed can support several effective factors simultaneous with optimal operation policy. It also reduces the quantitative and qualitative problems of the aquifer and cause increases the stability of the groundwater system.

Key words: Groundwater resources, groundwater level changes, TDS, Optimal operation, Stability of groundwater system.

مقدمه

منطقه مورد مطالعه حدود ۵۴۰ میلیون متر مکعب در سال است که به ۳۹۵ میلیون متر مکعب در سال می‌رسد. چاکرانی و همکاران (۷)، توسط مدل سیستم ارزیابی و برنامه ریزی آب (WEAP) و الگوریتم بهینه سازی چند منظوره (NSGA-II) به بهینه سازی معیار پایداری فازی و کمبود عادی عرضه در مقایسه با تقاضا پرداختند. نتایج نشان دهنده افزایش پایداری مخزن ۳۷ درصد و پایداری سفره‌های زیرزمینی تا ۱۶ درصد بود. الهامیان و همکاران (۸)، در تحقیقی به منظور مدیریت بهینه آبخوان نویندگان از مدل GMS، شبکه عصبی مصنوعی و یک مدل بهینه ساز چند هدفه استفاده نمودند. نتایج نشان داد که فرآیند بهینه سازی باعث کم شدن کاهش سالانه سطح آب تا ۶۸ درصد در مقایسه با افت‌های مشاهده شده در دشت می‌شود و مقادیر کیفی نیز نسبت به مقادیر مشاهده شده آن‌ها بهبود می‌یابد. رنجبر و مهجوری (۹)، در تحقیق خود به منظور مدیریت کمیت و کیفیت آبخوان قم از یک مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز، یک مدل رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی مدولار و تئوری شکاف اطلاعات استفاده نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که روش پیشنهادی می‌تواند یک سناریوی مدیریت قابل اعتماد با هزینه محاسباتی نسبتاً پایین ارائه دهد. محققان بسیاری، از الگوریتم‌های تکاملی چند هدفه در ترکیب با مدل‌های شبیه سازی به منظور مدیریت بهینه آب‌های زیرزمینی استفاده کرده اند که در این رابطه می‌توان به نوری و همکاران (۱۰)؛ کمالی و نیک سخن (۱۱)؛ علیزاده و همکاران (۱۲)؛ لل و داتا (۱۳)؛ یو و همکاران (۱۴)؛ مک فی و یه (۱۵)؛ موریدی و همکاران (۱۶)؛ حیدری و همکاران (۱۷)؛ وانگ و همکاران (۱۸)، کربیح و کشاری (۱۹)، داناپور (۲۰)، اسریکانس و داتا (۲۱)، صفوی و اسمی خانی (۲۲)، کارآموز و همکاران (۲۳)، اشاره نمود. هدف این تحقیق، تدوین یک مدل شبیه‌ساز-

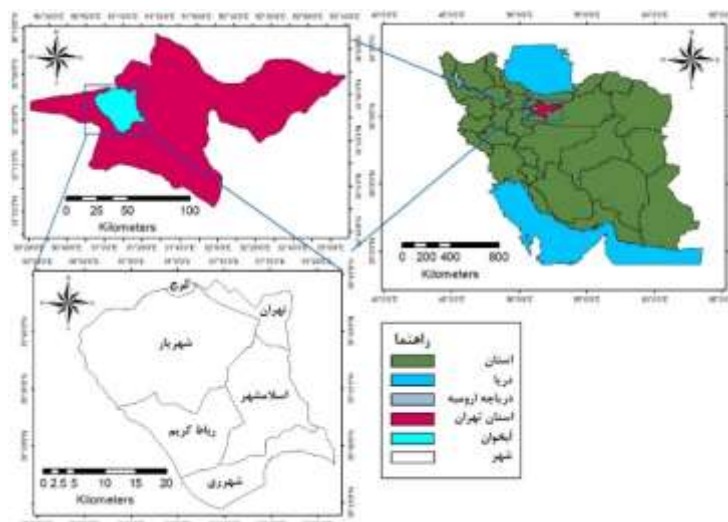
آب‌های زیرزمینی همواره در تأمین مصارف شرب، صنعت و کشاورزی به عنوان یک منبع مهم بوده و در برخی مواقع یک منبع اساسی به منظور تأمین نیازهای آبی به شمار می‌آیند. برای برنامه‌ریزی‌های بهینه و مناسب به منظور استفاده بهینه از پتانسیل‌های آبی دشت‌ها، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی سطح آب زیرزمینی و کیفیت آب زیرزمینی در دشت‌ها ضروری می‌باشد. و با توجه به این موضوع، در برخی موارد لازم است به جای مدل‌های عددی و فیزیکی از مدل‌های هوشمند و غیرخطی استفاده شود (۱). مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی توانایی درک روابط ضعیف هیدرولوژیک را دارند و نیز یک روش قدرتمند و مناسب در تحلیل داده‌های واقعی هستند (۲). همچنین مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی به دلیل داشتن توانایی بالا جهت پیش بینی دقیق، می‌توانند در استراتژی‌های مدیریت آب زیرزمینی به کار روند (۳). موعا شری و همکاران (۴)، به تخمین توزیع مکانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی دشت کاشان با روش ترکیبی زمین آمار، شبکه عصبی مصنوعی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک پرداختند. با توجه به نتایج، مقادیر سدیم، کلسیم و منیزیم به ترتیب با ضرایب ۹۹ و ۹۹ و ۹۸ درصد برآورد شدند. صفوی و همکاران (۵)، یک مدل شبیه‌ساز-بهینه ساز بر اساس شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم بهینه‌سازی مورچه برای حل منبع ماهانه آب آبیاری دشت نجف آباد اصفهان ارائه دادند. نتایج نشان داد که مدل شبیه‌ساز-بهینه ساز قادر به پیش‌بینی رفتار آبخوان و تعیین مقادیر مورد نیاز استخراج آب می‌باشد. خطیری و همکاران (۶)، با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT مقادیر تغذیه را مشخص نموده و با استفاده از مدل MODFLOW و الگوریتم‌های DREAM (zs) و MOPSO میزان بهینه هد و TDS را برآورد کردند. نتایج حاصل شده نشان داد که میزان آب استخراج شده از

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی دشت شه‌ریار در حاشیه غربی شهر تهران و در موقعیت جغرافیایی $35^{\circ} 22' 14''$ تا $50^{\circ} 22' 02''$ طول شرقی و $35^{\circ} 44' 32''$ تا $35^{\circ} 02' 25''$ عرض شمالی واقع شده است. مساحت تقریبی محدوده مورد مطالعه $897/214$ کیلومتر مربع می‌باشد که شهرهای شه‌ریار، اسلام‌شهر، رباط کریم و بخشی از شهرهای تهران و کرج و همچنین نواحی شمالی شهر ستان ری در آن قرار گرفته‌اند. شکل ۱ موقعیت محدوده مطالعاتی شه‌ریار را نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر منابع آب در دسترس در محدوده مورد مطالعه شامل آبخوان دشت شه‌ریار، جریان‌های سطحی رودخانه‌های کرج، کن، چیتگر و کانال غرب و رباط کریم (محمدیه) می‌باشد. در محدوده مطالعاتی، بخش کشاورزی از منابع آب سطحی زیرزمینی و بخش‌های شرب و صنعت تنها از منابع آب زیرزمینی استفاده می‌کنند. حجم برداشت از منابع آب زیرزمینی و سطحی در دوره زمانی مورد نظر در جدول ۱ نمایش داده شده است. مقیاس زمانی تمام داده‌های مورد بررسی به صورت ماهانه بوده و مربوط به سه سال آبی ۹۳ تا ۹۵ می‌باشد.

بهینه‌ساز به منظور بهره‌برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی جهت افزایش پایداری سیستم منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی و کاهش مشکلات کمی، کیفی و زیست محیطی منابع آب زیرزمینی می‌باشد. تاکنون در تحقیقات انجام شده از الگوریتم‌های فراابتکاری به همراه مدل‌های شبیه‌ساز به منظور بهره‌برداری بهینه از منابع آبی استفاده شده است. ولی تحقیق حاضر، به ترکیب مدل‌های کمی و کیفی شبکه‌های عصبی مصنوعی با مدل رگرسیون کیفی و مدل بهینه‌سازی چند هدفه به منظور بهینه‌سازی همزمان حجم برداشت از منابع آب زیرزمینی و تغییرات سطح آب زیرزمینی و کیفیت آب زیرزمینی پرداخته است. بنابراین نوآوری در تحقیق مورد نظر ارائه سیستم‌های بهره‌برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی با قابلیت پشتیبانی همزمان از تغییرات سطح آب زیرزمینی و کیفیت آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی با توجه به اهداف و محدودیت‌های تعریف شده و با ویژگی تعمیم به سایر مناطق دیگر می‌باشد.



شکل ۱- محدوده مطالعاتی دشت شه‌ریار در استان تهران

Figure 1. Shahriar plain study area in Tehran province

جدول ۱- حجم بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی و سطحی در بازه زمانی مطالعاتی

Table 1. Exploitation volume of ground and surface water resources in the study period

حجم بهره‌برداری (میلیون متر مکعب)				
سال آبی			منابع آبی	بخش مصارف
۹۶-۱۳۹۵	۹۵-۱۳۹۴	۹۴-۱۳۹۳		
۱۳۹/۷۱	۱۳۶/۷	۱۳۴/۴۷	سطحی	کشاورزی
۵۲۴/۷۱	۵۱۳/۶۱	۵۰۱/۸	زیرزمینی	
۲۰۷/۷۵	۱۹۰/۲۳	۱۹۲/۵۴	زیرزمینی	شرب
۵۲/۴۸	۴۸/۴۵	۵۰/۰۷	زیرزمینی	صنعت
۹۲۴/۶۵	۸۸۸/۹۹	۸۷۸/۸۸		مجموع

روند محاسبات مدل شبیه‌ساز - بهینه‌ساز

عصبی قرار گرفته و برآورد شدند. در تحقیق حاضر اهداف مورد نظر در مدل بهینه‌سازی در این تحقیق شامل هدف اول، حداقل نمودن میانگین نسبت تغییرات تراز آب زیرزمینی به حداکثر آن و هدف دوم، حداقل نمودن میانگین نسبت کل مواد جامد محلول آب زیرزمینی به حداکثر آن، می‌باشد. پیش از مرحله بهینه‌سازی، تغییرات تراز و کل مواد جامد محلول آب زیرزمینی توسط شبکه عصبی مصنوعی شبیه‌سازی شده اند و سپس کل مواد جامد محلول آب زیرزمینی توسط رگرسیون پیش‌بینی شده است. محاسبه مدل کیفی رگرسیون توسط نرم افزار (SPSS) انجام شده است. در نهایت تغییرات تراز آب زیرزمینی حاصل شبکه عصبی و کل مواد جامد محلول آب زیرزمینی حاصل از رگرسیون وارد مدل بهینه‌سازی شدند. الگوریتم فرآیند محاسبات مدل شبیه‌ساز - بهینه‌ساز مطالعه حاضر در شکل ۲ نشان داده شده است.

در این تحقیق برای محاسبه تغییرات تراز آب زیرزمینی توسط شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون، از داده‌های حجم آب زیرزمینی ورودی و خروجی در مرزهای محدوده، تغذیه از سطح و تخلیه آب زیرزمینی توسط چاه‌های بهره‌برداری به عنوان ورودی و از تغییرات تراز آب زیرزمینی به عنوان خروجی استفاده شده است. داده‌های حجم آب زیرزمینی ورودی و خروجی در مرزهای محدوده، تغذیه از سطح و تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های اولیه و مدل (GIS) محاسبه شدند. آمار و اطلاعات مربوطه به همراه دبی چاه‌های بهره‌برداری و (TDS) آب زیرزمینی، از شرکت مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران و مدیریت منابع آب ایران دریافت شده است. محاسبه کل مواد جامد محلول آب زیرزمینی توسط شبکه عصبی همانند تغییرات تراز آب زیرزمینی بوده با این تفاوت که از آن با واحد (میلی‌گرم بر لیتر)، به عنوان خروجی شبکه عصبی استفاده شده است. به دلیل اینکه مقادیر کیفی آبخوان به طور مستقیم تحت تاثیر مقادیر کمی آبخوان می‌باشند، داده‌های کمی در ورودی شبکه

$$GWQ_{\max} = \begin{cases} \text{if } Q - Q_{\max} \leq 0 & , 0 \\ \text{else} & Q - Q_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

$$GWQ_{\min} = \begin{cases} \text{if } Q - Q_{\min} \geq 0 & , 0 \\ \text{else} & Q - Q_{\min} \end{cases} \quad (4)$$

$$wtcp = \frac{Q - Q_p}{A \times S_y} \quad (5)$$

$$wtct = \begin{cases} \text{if } wtc \leq 0 \ \&\& \ wtcp < 0 & , \ wtc + |wtcp| \\ \text{elseif } wtc \leq 0 \ \&\& \ wtcp > 0 & , \ wtc - wtcp \\ \text{elseif } wtc > 0 \ \&\& \ wtcp \leq 0 & , \ wtc + |wtcp| \\ \text{elseif } wtc > 0 \ \&\& \ wtcp > 0 & , \ wtc - wtcp \end{cases} \quad (6)$$

$$WT_{\max} = \begin{cases} \text{if } |wtct| - \Delta L_{\max} \leq 0 & , 0 \\ \text{else} & |wtct| - \Delta L_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

می شوند و در نهایت به تابع هدف افزوده می شود. حداکثر حجم مصارف آب زیرزمینی Q_{\max} برابر مقدار فعلی و حداقل حجم مصارف آب زیرزمینی Q_{\min} برابر ۶۰ درصد حالت فعلی برآورد شده اند. حداقل حجم مصارف بر اساس شرایط منابع و مصارف محدوده مورد مطالعه، محاسبه شد. ضریب ثابت α و β برابر ۱۰ و γ نیز برابر ۱۰۰۰۰ در تابع جریمه اول نظر گرفته شده اند. در معادلات زیر تابع هدف و قیودات برای بهینه سازی کیفی آبخوان ارائه شده است.

محاسبه کل مواد جامد محلول (TDS) بهینه

در این تحقیق، استاندارد (کل مواد جامد محلول) به منظور بهینه سازی TDS آب زیرزمینی با توجه به استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO) و استاندارد سازمان خوار و بار جهانی (فائو)، همچنین با توجه به شرایط کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی و نیز اهداف مدل بهینه سازی، ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد. بر اساس روابط زیر کیفیت بهینه آب زیرزمینی محاسبه شده است. مطابق رابطه (۸)، Z_2 تابع هدف دوم می باشد. همچنین، C_{sta} کیفیت استاندارد TDS آب زیرزمینی، می باشد. تابع جریمه $penalty$ function مقدار جریمه ای می باشد که در صورت عدم رعایت کیفیت آب زیرزمینی محاسباتی به اندازه مقدار استاندارد و یا کمتر از آن، محاسبه شده و به تابع هدف دوم افزوده می شود. در تابع جریمه دوم ضریب ثابت ω ، برابر ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد.

مقدار Q حجم مصارف آب زیرزمینی (میلیون متر مکعب) و متغیر تصمیم می باشد. همچنین ΔL_{\max} حداکثر مجاز تغییرات تراز آب زیرزمینی (متر)، m تعداد ماه و y تعداد سال می باشند. در این مطالعه با توجه به آمار و اطلاعات ماهانه و سالانه تغییرات تراز آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه، شرایط آبخوان، حداکثر مجاز تغییرات تراز آب زیرزمینی، ΔL_{\max} برابر ۰/۰۴ متر در ماه در نظر گرفته شد. در تحقیقات متعددی از حداکثر مجاز تغییرات تراز آب زیرزمینی به عنوان یک عامل محدود کننده استفاده شده است که مقدار آن با توجه به شرایط تحقیقات انجام شده متفاوت می باشد. طبری و یزدی (۲۴)، در تحقیقی در مورد بهره برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی با رویکرد انتقال آب بین حوضه ای، مقدار حداکثر مجاز تغییرات تراز آب زیرزمینی ۰/۰۵ متر در ماه در نظر گرفتند. صادقی طبس و همکاران (۲۵)، در تحقیق خود با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی تک و چند هدفه، مقدار حداکثر مجاز تغییرات تراز آب زیرزمینی ۰/۴۰ متر در سال در نظر گرفتند. در این محاسبات حجم مصارف آب زیرزمینی بهینه در بخش های شرب، صنعت و کشاورزی Q ، متغیر تصمیم و Q_p حجم مصارف آب زیرزمینی فعلی می باشد. معادله $penalty$ function تابع جریمه بوده و در صورتی که محدودیت های حداکثر و حداقل حجم مصارف GWQ_{\max} و GWQ_{\min} ، حداکثر تغییرات تراز آب زیرزمینی WT_{\max} رعایت نشود، مقادیر جریمه آن ها توسط تابع جریمه محاسبه

$$Z_2 = \text{Minimize} \left(\frac{\sum_t^{nt} (RC)}{(C_{sta} \times m \times y)} \right) + \text{penalty function} \quad (8)$$

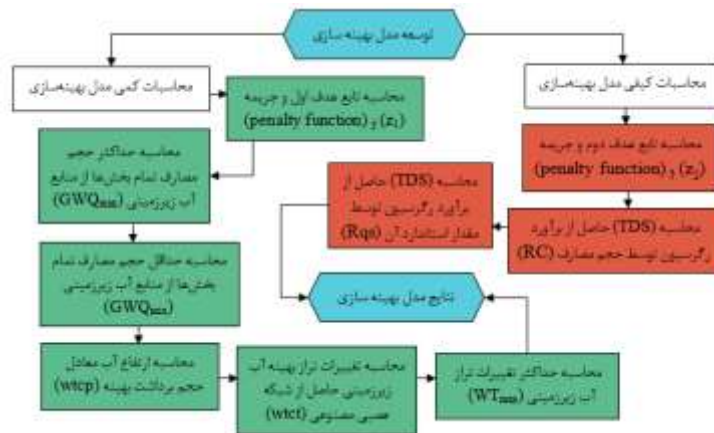
$$\text{penalty function} = ((Rqs)^2 \times \omega) \quad (9)$$

$$RC = 243.729 + (6.502 \times Q) \quad (10)$$

$$Rqs = \begin{cases} \text{if} & RC - C_{sta} \leq 0, & 0 \\ \text{else} & & RC - C_{sta} \end{cases} \quad (11)$$

در نظر گرفته شد. جهت تعیین اندازه جمعیت کروموزم‌ها، الگوریتم با چهار جمعیت ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ و هر جمعیت با ۴۰۰ تکرار اجرا شد که در نهایت بهترین جمعیت با بررسی نتایج هر اجرا انتخاب شد. شکل ۳ ساختار مدل بهینه‌سازی را نمایش می‌دهد.

به طور کلی در این سناریو، متغییر تصمیم حجم مصارف آب زیرزمینی Q ، برای هر ماه و به مدت سه سال ۹۳ تا ۹۵ در نظر گرفته شده است. بنابراین تعداد کل متغییرهای تصمیم برابر با ۳۶ خواهد بود. برای انجام مدل بهینه‌سازی در تحقیق مورد نظر، اندازه جمعیت کروموزم‌ها ۲۰۰ و تعداد تکرارها ۱۰۰۰ دور



شکل ۳- ساختار مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری کمی و کیفی از منابع آب زیرزمینی

Figure 3. Structure of optimization model of quantitative and qualitative utilization of groundwater resources

نتایج و بحث

نتایج شبکه عصبی و تخصیص حجم برداشت بهینه از منابع آب زیرزمینی

مدل آماری SPSS استفاده شده و داده‌های حجم مصارف، تغییرات تراز آب زیرزمینی و غلظت TDS وارد مدل مربوطه شدند. بر اساس نتایج، معیار (کایزر-میر-الکین) برابر ۰/۶۶۳ برآورد شد. و به دلیل اینکه این معیار در بازه ۰/۶ تا ۰/۶۹ قرار دارد کفایت داده‌ها در سطح متوسط ارزیابی شدند. بنابراین نتایج مدل‌های کمی و کیفی شبکه عصبی قابل اطمینان بوده و از دقت مناسبی برخوردارند. که با توجه به این موضوع، عملکرد مدل کمی شبکه عصبی مصنوعی جهت برآورد سطح آب‌های زیرزمینی، مناسب ارزیابی شده است (۲۶). همچنین حیدرزاده (۲۷)، با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی سدیم آب

تغییرات تراز آب زیرزمینی حاصل از شبکه عصبی (مدل کمی) دارای دقت بیشتری نسبت به کل مواد جامد محلول آب زیرزمینی حاصل از شبکه عصبی (مدل کیفی) می‌باشد. معیار ضریب همبستگی (R) در سطح (۰/۰۵) در سه وضعیت برای مقادیر مشاهداتی (مقادیر لایه خروجی) و محاسباتی (خروجی شبکه) هر دو متغییر معنی‌دار است. جهت اطمینان از نتایج مدل کمی و کیفی شبکه عصبی مصنوعی تحلیل کفایت داده‌ها نیز انجام شد. به این منظور از آزمون (کایزر-میر-الکین) در

بهره‌برداری در شرایط موجود کاهش یافته است. در این تحقیق به دلیل این که، بخش‌های شرب، صنعت در اولویت تامین نیاز قرار دارند، ابتدا نیاز بخش‌های مورد نظر تامین می‌شود سپس نیاز بخش کشاورزی تامین خواهد شد. بنابراین با توجه به شرایط منابع و مصارف محدوده مطالعاتی، مقادیر کاهش یافته مصارف می‌تواند در بخش کشاورزی اعمال شود. جدول ۲ تخصیص حجم بهینه منابع آب زیرزمینی در دوره زمانی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول نیاز بخش‌های شرب، صنعت به طور کامل تامین شده و نیاز بخش کشاورزی با استفاده از منابع آب سطحی و زیرزمینی به طور میانگین به میزان ۳۷/۶۱ درصد تامین شده که نسبت به حالت فعلی به میزان ۲۵/۹۴ درصد کاهش یافته است. یی و همکاران (۲۹) در تحقیق خود به این نتیجه دست یافتند که مصرف آب زیرزمینی ۲۴ درصد کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که باید سطح زیر کشت محصولات کشاورزی منطقه کاهش پیدا کند تا به این صورت درصد تامین نیاز بخش کشاورزی افزایش پیدا کند.

زیرزمینی را پیش بینی نمودند. در این تحقیق حجم برداشت بهینه با توجه به اهداف مسئله و محدودیت‌های تغییرات تراز و کیفیت آب زیرزمینی حاصل شده و متناسب با تغییرات تراز و کیفیت آب زیرزمینی می‌باشد. رضایی و همکاران (۲۸)، در تحقیق خود به واسطه ارائه الگوریتم جدید با نام بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند منظوره فازی، تقاضای آب را تقریباً با حداقل تغییرات ماهانه و تجمعی سطح آب زیرزمینی برآورد نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که الگوریتم مورد نظر قادر به یافتن راه حل بهینه منحصر به فرد به منظور تسهیل تصمیم‌گیری برای حل مشکلات بهینه سازی در مقیاس بزرگ است. بر اساس نتایج به دست آمده، حجم مصارف بهینه بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی در دوره زمانی سال‌های آبی ۹۳، ۹۴ و ۹۵ در مجموع، برابر ۱۶۰۲/۲۲ میلیون متر مکعب می‌باشد که به اندازه ۶۵۸/۳۶ میلیون متر مکعب کمتر از مقدار فعلی آن برآورد شده است. همچنین حجم بهره‌برداری بهینه از آبخوان، به طور میانگین ۵۳۴/۰۷ میلیون متر مکعب در سال می‌باشد. که ۲۹/۱۲ درصد نسبت به میانگین حجم

جدول ۲- سیاست تخصیص بهینه منابع آب زیرزمینی در بازه زمانی مطالعاتی

Table 2. Policy for optimal allocation of groundwater resources in the study period

سال آبی	تخصیص بهینه به مصارف (میلیون متر مکعب)		
	شرب	صنعت	کشاورزی
۹۳	۲۳۰/۳۵	۵۹/۹	۲۳۶/۶۱
۹۴	۲۲۶/۱۴	۵۷/۶	۲۴۲/۳۸
۹۵	۲۲۷/۱۹	۵۷/۳۹	۲۶۴/۶۷

تعیین تغییرات تراز و کیفیت بهینه آب زیرزمینی

عصبی مصنوعی (ANN) و مدل بهینه سازی الگوریتم ژنتیک چند هدفه (NSGA-II) بوده است، برداشت از منابع آب زیرزمینی ۵۸/۳ درصد کمتر از حالت فعلی شده و سطح آب زیرزمینی به اندازه ۳ متر افزایش یافته است. جدول ۳ تغییرات سطح آب زیرزمینی مشاهداتی، برآورد شبکه عصبی مصنوعی و بهینه در دوره زمانی مورد نظر را نشان می‌دهد. تغییرات سطح آب زیرزمینی بهینه در سال آبی ۹۳، ۹۴ و ۹۵ نسبت به تغییرات تراز برآورد شبکه عصبی مصنوعی به اندازه ۹/۱۵،

بر اساس نتایج حاصل شده، تغییرات تراز آب زیرزمینی بهینه نسبت به تغییرات تراز حاصل از شبکه عصبی مصنوعی در بازه زمانی مطالعاتی، افزایش چشمگیری یافته است و دلیل مهم آن کاهش برداشت از آبخوان جهت مصارف در بخش‌های مختلف می‌باشد. با توجه به این موضوع، تحقیق فرهادی و همکاران (۳۰)، که به منظور مدیریت آب‌های زیرزمینی در آبخوان دربان، استان فارس انجام شده و با استفاده از چارچوب مدل سازی Nash که شامل مدل شبیه‌سازی MODFLOW، شبکه

۶۹۴/۶۶ و ۳۸۲/۷۴ میلی گرم بر لیتر بوده که به میزان ۲۱/۷۶ و ۱۲/۲۸ در صد نسبت به وضعیت موجود کاهش یافته‌اند. و در این مورد نیز بازه کاهش این متغییر به دلیل ارتباط آن با حجم برداشت از آبخوان، به همین میزان می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که الگوریتم تلاش کرده است در طول بازه زمانی مورد نظر، ماه‌هایی که حجم مصارف بالاتری دارند را بیشتر کاهش دهد و به این صورت حجم برداشت از آبخوان کاهش بیشتری یابد و با تغییرات سطح آب زیرزمینی و کیفیت آب زیرزمینی به عنوان عوامل مهم تاثیرگذار بر رفتار آبخوان، کنترل شود. کل مواد جامد محلول بهینه و برآورد شبکه عصبی مصنوعی در بازه زمانی مورد نظر به طور میانگین برابر ۵۳۳/۱۱ و ۶۵۳/۹۸ میلی گرم بر لیتر می‌باشند. که با توجه به این موضوع، کیفیت بهینه آب زیرزمینی به میزان ۱۲۰/۸۷ میلی گرم بر لیتر کمتر از مقدار شبکه عصبی می‌باشد. این در حالی است که کاهش آلاینده TDS فقط با به روز رسانی مدیریت بهره‌برداری از سیستم‌های آبی در مقایسه با رویکرد سازه‌ای و پرهزینه‌تر، قابل مشاهده است. و در صورت ترکیب رویکرد غیرسازه‌ای و سازه‌ای، می‌توان با هزینه به مراتب کمتری نسبت به شرایطی که تنها رویکرد سازه‌ای اعمال می‌شود، مدیریت کیفیت سیستم‌های آبی را با عملکرد بالاتری انجام داد.

۹/۱۳ و ۹/۵۳ متر افزایش یافته است. همچنین بیشترین حجم مصرف بهینه ماهانه در طول بازه زمانی مورد مطالعه برابر ۶۹/۳۵ میلیون متر مکعب در سال آبی ۹۳ و کمترین مقدار آن برابر ۲۱/۳۷ میلیون متر مکعب در سال آبی ۹۴ می‌باشد. که تغییرات تراز بهینه آب زیرزمینی مربوطه به میزان ۱/۲ و ۰/۳۷ متر نسبت به برآورد شبکه عصبی افزایش یافته است. و بازه افزایش این متغییر نیز به همین میزان می‌باشد. زیرا حجم مصارف متناسب با تغییرات تراز آب زیرزمینی محاسبه شده است. بنابراین بازه تغییرات متغییرهای مورد نظر نیز در ارتباط با یکدیگر می‌باشند. و این عامل منجر به افزایش تغییرات تراز بهینه نسبت به مقادیر حاصل از شبکه عصبی می‌شود. در صورت اعمال سیاست بهره‌برداری بهینه، به طور میانگین سطح آب زیرزمینی به اندازه ۹/۲۷ متر در سال افزایش خواهد یافت و این امر موجب افزایش پایداری سیستم آب زیرزمینی می‌شود. نتایج تحقیق رضایی و صفوی (۳۱) نشان داد که کاهش تجمعی سطح آب زیرزمینی به طور قابل توجهی در کل دوره برنامه‌ریزی کاهش می‌یابد و منجر به پایداری سفره آب زیرزمینی می‌شود، در حالی که بهره‌وری آب در سطح مطلوبی نگه داشته خواهد شد. با توجه به این که، بیشترین و کمترین حجم مصرف بهینه ماهانه در طول بازه زمانی مورد نظر در سال آبی ۹۳ و ۹۴ اتفاق افتاده، بیشترین و کمترین غلظت بهینه TDS مربوطه نیز برابر

جدول ۳- تغییرات سطح آب زیرزمینی مشاهداتی، حاصل از شبکه عصبی مصنوعی و بهینه

Table 3. Observational groundwater level changes, artificial neural network estimation and Optimal

سال آبی	تغییرات تراز آب زیرزمینی (متر)	
	مشاهداتی	شبکه عصبی مصنوعی
۹۳	-۹/۶۸۶	-۹/۶۸۹
۹۴	-۴/۸۳	-۴/۸۳
۹۵	-۴/۶۳۲	-۴/۶۲۸

نتیجه گیری

معیار ضریب همبستگی (R) در سطح ۰/۰۵ در تمام وضعیت‌ها برای مقادیر مشاهداتی و محاسباتی هر دو متغییر معنی‌دار بوده است. بنابراین پیش‌بینی مدل‌های کمی و کیفی شبکه عصبی

بر اساس معیارهای ارزیابی مدل‌های کمی و کیفی شبکه عصبی مصنوعی دقت محاسبه تغییرات تراز آب زیرزمینی نسبت کل مواد جامد محلول آب زیرزمینی در تمام وضعیت‌ها بیشتر است.

- level modeling. Journal of hydrology, 572, pp.336-351.
2. Banerjee, P., Singh, V.S., Chattopadhyay, K., Chandra, P.C. and Singh, B., 2011. Artificial neural network model as a potential alternative for groundwater salinity forecasting. Journal of Hydrology, 398(3-4), pp.212-220.
 3. Coppola Jr, E.A., Rana, A.J., Poulton, M.M., Szidarovszky, F. and Uhl, V.W., 2005. A neural network model for predicting aquifer water level elevations. Groundwater, 43(2), pp.231-241.
 4. Moasheri, S.A., Rezapour, O.M., Beyranvand, Z. and Poornoori, Z., 2013. Estimating the spatial distribution of groundwater quality parameters of Kashan plain with integration method of Geostatistics-Artificial Neural Network Optimized by Genetic-Algorithm. International Journal of Agriculture and Crop Sciences, 5(20), p.2434.
 5. Safavi, H.R. and Enteshari, S., 2016. Conjunctive use of surface and ground water resources using the ant system optimization. Agricultural Water Management, 173, pp.23-34.
 6. Khatiri, K.N., Niksokhan, M.H., Sarang, A. and Kamali, A., 2020. Coupled Simulation-Optimization Model for the Management of Groundwater Resources by Considering Uncertainty and Conflict Resolution. Water Resources Management, 34(11), pp.3585-3608.
 7. Chakraei, I., Safavi, H.R., Dandy, G.C. and Golmohammadi, M.H., 2021. Integrated Simulation-Optimization Framework for Water Allocation Based on Sustainability of Surface Water and Groundwater Resources. Journal of

مصنوعی بر اساس معیارهای ارزیابی مورد نظر، دارای دقت مناسب و قابل قبول بوده که این امر منجر به افزایش دقت و اعتبار نتایج حاصل از مدل شبیه ساز- بهینه ساز شده است. همچنین الگوریتم ژنتیک چند هدفه (NSGA-II) با توجه به محدودیت تغییرات تراز و کیفیت آب زیرزمینی بهترین مجموعه جواب را محاسبه نموده و بر اساس آن بهترین مقادیر بهینه مورد نظر برآورد شده و سپس با توجه به نتایج مورد نظر، الگوی مدیریت بهینه آبخوان تدوین شده است. در این تحقیق مدل شبیه ساز- بهینه ساز، سیاست بهره برداری بهینه را طوری تعیین نموده که علاوه بر ایجاد تناسب بین حجم بهره برداری و تغییرات تراز و کیفیت آب زیرزمینی، باعث کاهش ۲۹/۱۲ درصد برداشت از آبخوان، افزایش تغییرات تراز آبخوان به اندازه ۲۷/۸۱۲ متر و کاهش غلظت TDS آب زیرزمینی به میزان ۱۲۰/۸۷ میلی گرم بر لیتر در بازه زمانی مورد مطالعه شده است. با توجه به نتایج تحقیق مورد نظر، پیشنهاد می شود که در بهره برداری بهینه از منابع آبی اولویت منابع و مصارف رعایت شده و به دلیل این که مصارف عمده از منابع آبی مربوط به بخش کشاورزی می باشد سطح زیر کشت محصولات کشاورزی متناسب با مصارف آبی کاهش پیدا کند و از محصولاتی که نیاز به آب کمتری نسبت به سایر محصولات دیگر دارند استفاده شود. در این صورت تامین نیاز افزایش یافته و نیز تغییرات تراز و کیفیت آب زیرزمینی متناسب با حجم مصارف افزایش و کاهش خواهند یافت. با توجه به این موضوع، تحقیق حاضر با ارائه روش شبیه ساز- بهینه ساز و سیاست بهره برداری بهینه، می تواند همزمان از چند عامل موثر پشتیبانی کند و مسائل و مشکلات کمی و کیفی آبخوان را کاهش دهد و منجر به افزایش پایداری منابع آب زیرزمینی شود و به این صورت از بروز مشکلات پیچیده تر جلوگیری به عمل آورد. بنابراین مدل مورد نظر به عنوان یک ابزار کاربردی با عملکرد مناسب و دقیق و نیز کم هزینه و با سرعت مطلوب توصیه می شود.

References

1. Rajaei, T., Ebrahimi, H. and Nourani, V., 2019. A review of the artificial intelligence methods in groundwater

- environmental management, 234, pp.115-130.
14. Yu, X., Srekanth, J., Cui, T., Pickett, T. and Xin, P., 2021. Adaptive DNN emulator-enabled multi-objective optimization to manage aquifer– sea flux interactions in a regional coastal aquifer. *Agricultural Water Management*, 245, p.106571.
 15. McPhee, J. and Yeh, W.W.G., 2004. Multiobjective optimization for sustainable groundwater management in semiarid regions. *Journal of water resources planning and management*, 130(6), pp.490-497.
 16. Moridi, A., Tabatabaie, M.R.M. and Esmaealzade, S., 2018. Holistic approach to sustainable groundwater management in semi-arid regions. *International Journal of Environmental Research*, 12(3), pp.347-355.
 17. Heydari, F., Saghafian, B. and Delavar, M., 2016. Coupled quantity-quality simulation-optimization model for conjunctive surface-groundwater use. *Water Resources Management*, 30(12), pp.4381-4397.
 18. Wang, Y., Yang, J. and Chang, J., 2019. Development of a coupled quantity-quality-environment water allocation model applying the optimization-simulation method. *Journal of Cleaner Production*, 213, pp.944-955.
 19. Kerebih, M.S. and Keshari, A.K., 2021. Distributed Simulation-optimization Model for Conjunctive Use of Groundwater and Surface Water Under Environmental and Sustainability Restrictions. *Water Resources Management*, pp.1-19.
 20. Danapour, M., Fienen, M.N., Højberg, A.L., Jensen, K.H. and Stisen, S., 2021. *Water Resources Planning and Management*, 147(3), p.05021001.
 8. Elhamian, S.A.B., Rakhshandehroo, G. and Javid, A.H., 2021. Quantitative and Qualitative Optimization of Water Allocation in No Bandegan Aquifer using an Agent-based Approach. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, pp.1-12.
 9. Ranjbar, A. and Mahjouri, N., 2020. Multi-objective freshwater management in coastal aquifers under uncertainty in hydraulic parameters. *Natural Resources Research*, 29(4), pp.2347-2368.
 10. Nouri, I., Yitayew, M., Maßmann, J. and Tarhouni, J., 2015. Multi-objective optimization tool for integrated groundwater management. *Water Resources Management*, 29(14), pp.5353-5375.
 11. Kamali, A. and Niksokhan, M.H., 2017. Multi-objective optimization for sustainable groundwater management by developing of coupled quantity-quality simulation-optimization model. *Journal of Hydroinformatics*, 19(6), pp.973-992.
 12. Alizadeh, M.R., Nikoo, M.R. and Rakhshandehroo, G.R., 2017. Hydro-environmental management of groundwater resources: a fuzzy-based multi-objective compromise approach. *Journal of Hydrology*, 551, pp.540-554.
 13. Lal, A. and Datta, B., 2019. Multi-objective groundwater management strategy under uncertainties for sustainable control of saltwater intrusion: Solution for an island country in the South Pacific. *Journal of*

- for groundwater level forecasting and assessment of the relative impacts of influencing factors. *Hydrogeology Journal*, 27(2), pp.567-579.
27. Heidarzadeh, N., 2017. A practical low-cost model for prediction of the groundwater quality using artificial neural networks. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 66(2), pp.86-95.
28. Rezaei, F., Safavi, H.R., Mirchi, A. and Madani, K., 2017. f-MOPSO: An alternative multi-objective PSO algorithm for conjunctive water use management. *Journal of Hydro-environment Research*, 14, pp.1-18.
29. Ye, Q., Li, Y., Zhuo, L., Zhang, W., Xiong, W., Wang, C. and Wang, P., 2018. Optimal allocation of physical water resources integrated with virtual water trade in water scarce regions: A case study for Beijing, China. *Water research*, 129, pp.264-276.
30. Farhadi, S., Nikoo, M.R., Rakhshandehroo, G.R., Akhbari, M. and Alizadeh, M.R., 2016. An agent-based-nash modeling framework for sustainable groundwater management: A case study. *Agricultural Water Management*, 177, pp.348-358.
31. Rezaei, F. and Safavi, H.R., 2020. f-MOPSO/Div: an improved extreme-point-based multi-objective PSO algorithm applied to a socio-economic-environmental conjunctive water use problem. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(12), pp.1-27.
- Multi-constrained catchment scale optimization of groundwater abstraction using linear programming. *Groundwater*.
21. Sreekanth, J. and Datta, B., 2010. Multi-objective management of saltwater intrusion in coastal aquifers using genetic programming and modular neural network based surrogate models. *Journal of hydrology*, 393(3-4), pp.245-256.
22. Safavi, H.R. and Esmikhani, M., 2013. Conjunctive use of surface water and groundwater: application of support vector machines (SVMs) and genetic algorithms. *Water Resources Management*, 27(7), pp.2623-2644.
23. Karamouz, M., Tabari, M.M.R. and Kerachian, R., 2007. Application of genetic algorithms and artificial neural networks in conjunctive use of surface and groundwater resources. *Water International*, 32(1), pp.163-176.
24. Tabari, M.M.R. and Yazdi, A., 2014. Conjunctive use of surface and groundwater with inter-basin transfer approach: case study Piranshahr. *Water resources management*, 28(7), pp.1887-1906.
25. Sadeghi-Tabas, S., Samadi, S.Z., Akbarpour, A. and Pourreza-Bilondi, M., 2017. Sustainable groundwater modeling using single-and multi-objective optimization algorithms. *Journal of Hydroinformatics*, 19(1), pp.97-114.
26. Lee, S., Lee, K.K. and Yoon, H., 2019. Using artificial neural network models