Archive of SID

مقاله پژوهشی

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 آقایاری[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 شبیه سازی شده‌اند. سپس TDS آب زیرزمینی توسط رگرسیون برآورد شده است. و در نهایت از الگوریتم ژنتیک چند هدفه (NSGA-II) به‌منظور 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 صحت سنجی برای تغییرات سطح آب زیرزمینی به ترتیب برابر ۱/۲۷e-۰۶، ۰/۰۰۲۵ 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 متغییر معنی‌دار بود. همچنین در بازه زمانی مورد مطالعه، حجم برداشت

۱- دانشجوی دکترای 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.* (مسوول 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.

www.SID.ir

Archive of SID

بهینه از آبخوان به میزان ۲۹/۱۲ درصـــد 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 حاصـل نتایج نشـان داد که روش شـبیه‌سـازی-بهینه‌سـازی پیشـنهادی 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.

www.SID.ir

Archive of SID

J. Env. Sci. Tech., Vol 24, No. 3, June, 2022

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

Nima Salehi Shafa[1]
Hossein Babazadeh [2 *]
h_babazadeh@hotmail.com
Fayyaz Aghayari[3]
Ali Saremi[4]

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

www.SID.ir

Archive of SID

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

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 تامین 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 شبیه ساز-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 شبیه ساز-بهینه ساز قادر به پیش‌بینی رفتار آبخوان و تعیین مقادیر مورد نیاز استخراج آب می باشد. 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 منطقه مورد مطالعه حدود ۵۴۰ میلیون متر مکعب در سال است که به ۳۹۵ میلیون متر مکعب در سال می‌رسد. چاکرائی 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 نوبندگان 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 الگوریتم های تکاملی چند هدفه در ترکیب با مدل های شبیه سازی به منظور مدیریت بهینه آب های 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 وکشاری (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-

www.SID.ir

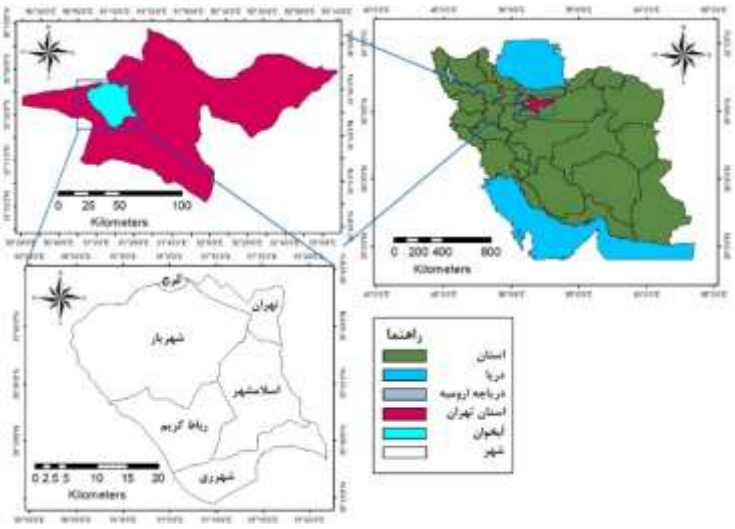
Archive of SID

بهینه‌ســـاز به منظور بهره‌برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی جهت افزایش پایداری ســـیســـتم منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی و کاهش مشکلات کمی، کیفی و زیست محیطی منابع آب زیرزمینی می‌باشـــد. تاکنون در تحقیقات انجام شـــده از الگوریتم‌های فراابتکاری به همراه مدل‌های شـبیه‌ساز به منظور بهره‌برداری بهینه از منابع آبی ا ستفاده شده ا ست. ولی تحقیق حاضـــر، به ترکیب مدل‌های کمی و کیفی شـــبکه‌های عصـــبی مصنوعی با مدل رگرسیون کیفی و مدل بهینه سازی چند هدفه به منظور بهینه‌ســـازی همزمان حجم برداشـــت از منابع آب زیرزمینی و تغییرات سطح آب زیرزمینی و کیفیت آب زیرزمینی پرداخ ته اســـت. بـ نابراین نوآوری در تحقیق مورد نظر ارا ئه سیا ست‌های بهره‌برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی با قابلیت پشتیبانی همزمان از تغییرات سطح آب زیرزمینی و کیفیت آب زیرزمینی در محـدوده مطـالعـاتی بـا توجـه بـه اهـداف و محدودیت‌های تعریف شـــده و با ویژگی تعمیم به ســـایر مناطق دیگر می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه مورد مطالعه

محدودۀ مطالعاتی د شت شهریار در حا شیۀ غربی شهر تهران و در موقعیت جغرافیایی "۱۴ '۲۲ °۵۰ تا " ۰۲ '۲۲ °۵۱ طول شـــرقی و "۳۲ '۴۴ °۳۵ تا " ۲۵ '۰۲ °۳۵ عرض شـــمالی واقع شـــده اســـت. مســـاحت تقریبی محدوده مورد مطالعه ۸۹۷/۲۱۴ کیلومتر مربع می‌با شد که شهرهای شهریار، ا سلام شهر، رباط کریم و بخشـــی از شـــهرهای تهران و کرج و همچنین نواحی شمالی شهر ستان ری در آن قرار گرفته اند. شکل ۱ موقعیت محدوده مطالعاتی شـــهریار را نشـــان می‌دهد. در تحقیق حاضـــر منابع آب در دســـترس در محدودۀ مورد مطالعه شـــامل آبخوان دشـــت شـــهریار، جریان‌های ســـطحی رودخانه‌های کرج، کن، چیتگر و کانال غرب و رباط‌کریم (محمدیه) می باشـــد. در محدوده مطالعاتی، بخش کشـــاورزی از منابع آب ســـطحی و 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 شـــده اســـت. مقیاس زمانی تمام داده‌های مورد برر سی به صورت ماهانه بوده و مربوط به سه سال آبی ۹۳ تا ۹۵ می باشد.



شکل۱- محدوده مطالعاتی دشت شهریار در استان تهران

Figure 1. Shahriar plain study area in Tehran province

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۱- 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

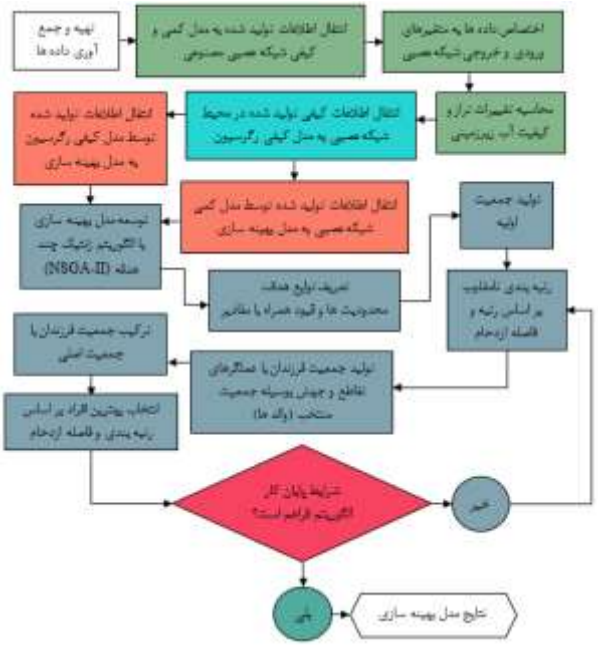
حجم بهره‌برداری (میلیون متر مکعب)				
بخش مصارف	منابع آبی	سال آبی		
		۹۴-۱۳۹۳	۹۵-۱۳۹۴	۹۶-۱۳۹۵
کشاورزی	سطحی	۱۳۴/۴۷	۱۳۶/۷	۱۳۹/۷۱
	زیرزمینی	۵۰۱/۸	۵۱۳/۶۱	۵۲۴/۷۱
شرب	زیرزمینی	۱۹۲/۵۴	۱۹۰/۲۳	۲۰۷/۷۵
صنعت	زیرزمینی	۵۰/۰۷	۴۸/۴۵	۵۲/۴۸
مجموع		۸۷۸/۸۸	۸۸۸/۹۹	۹۲۴/۶۵

روند محاسبات مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز

در این تحقیق برای محا سبه تغییرات تراز آب زیرزمینی تو سط شـــبکه عصـــبی مصـــنوعی پرســـپترون، از داده‌های حجم آب زیرزمینی ورودی و خروجی در مرزهای محدوده، تغذیه از سطح و تخلیه آب زیرزمینی توســـط چاه های بهره‌برداری به عنوان ورودی و از تغییرات تراز آب زیرزمینی به عنوان خروجی استفاده شـــده اســـت. داده‌های حجم آب زیرزمینی ورودی و خروجی در مرزهای محدوده، تغذیه از سطح و تغییرات سطح آب زیرزمینی با ا ستفاده از داده‌های اولیه و مدل (GIS) محا سبه شدند. آمار و اطلاعات مربوطه به همراه دبی چاه‌های بهره‌برداری و (TDS) آب زیرزمینی، از شرکت مهند سین م شاور سازه‌پردازی ایران و مدیریت منابع آب ایران دریافت شـده اسـت. محاسـبه 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 ا ستفاده شده ا ست. به دلیل اینکه مقادیر کیفی آبخوان به طور مســـتقیم تحت تاثیر مقادیر کمی آبخوان می باشند، داده های کمی در ورودی شبکه 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 نســـبت کل مواد جامد محلول آب زیرزمینی به حداکثر آن، می‌باشـــد. پیش از مرحله بهینه سازی، تغییرات تراز و کل مواد جامد محلول آب زیرزمینی توسط شبکه عصبی مصنوعی شبیه‌سازی شده اند و سپس کل مواد جامد محلول آب زیرزمینی توســـط رگرســـیون پیش‌بینی شـــده اســـت. محاســـبه مدل کیفی رگرســـیون توســـط نرم افزار (SPSS) انجام شده است. در نهایت تغییرات تراز آب زیرزمینی حاصـــل شـــبکه عصـــبی و کل مواد جامد محلول آب زیرزمینی حاصل از رگرسیون وارد مدل بهینه‌سازی شدند. الگوریتم فرآیند محاسبات مدل شبیه ساز- بهینه ساز مطالعه حاضر در شکل ۲ نشان داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل۲- روندنمای فرآیند محاسبات در مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز کمی و کیفی آب زیرزمینی

Figure 2. flow chart of the calculation process in the simulator-optimizer model of quantitative and qualitative of groundwater

طراحی شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی مورد نظر، دارای چهار بردار ورودی و یک بردار خروجی می‌باشد. و با توجه به آن که وارد کردن داده‌ها به صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت شبکه می شود، لذا در آموزش شبکه، پیش پردازش یا نرمالیزه کردن داده‌ها قبل از محاسبه و آنالیز شبکه انجام شد. سپس جهت طراحی شبکه، برای آنالیز تغییرات تراز آب زیرزمینی، چهار لایه، که شامل یک لایه ورودی، دو لایه پنهان و یک لایه خروجی می‌باشند، در نظر گرفته شد. لایه ورودی دارای بردار داده‌های ورودی می‌باشد و همچنین برای لایه اول پنهان ۵ نرون، لایه دوم پنهان ۱۰ نرون و لایه خروجی ۱ نرون، مورد محاسبه قرار گرفت. همچنین تابع انتقال نرون‌ها در لایه اول و دوم پنهان، تابع انتقال tansig و لایه خروجی، تابع انتقال purelin می‌باشند. در این تحقیق از شبکه پیش خور (newff)، در کد نویسی شبکه عصبی مورد نظر استفاده شده است. در ادامه، داده‌ها به منظور اختصاص به مراحل آموزش، صحت سنجی و آزمون، به سه دسته تقسیم شدند. با توجه به این موضوع، ۷۰ درصد داده‌ها به مرحله آموزش، ۱۵ درصد داده‌ها به مرحله صحت سنجی و ۱۵ درصد دیگر داده‌ها به مرحله آزمون اختصاص داده شد. همچنین به منظور آموزش شبکه، از الگوریتم لونبرگ-مارکوآرت استفاده شد. جهت ارزیابی عملکرد شبکه، از معیارهای ارزیابی ضریب همبستگی (r)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مربعات خطا (MSE)، استفاده شد.

ساختار مدل بهینه سازی

محاسبه تغییرات تراز بهینه آب زیرزمینی

در مدل بهینه سازی تدوین شده، تابع هدف اول برای اهداف این تحقیق z_1 مطابق معادله (۱) ارائه شده است.

$$Z_1=\text{Minimize}\left(\frac{\sum_t^{nt}(\text{wtct})}{(\Delta L_{MAX}\times m\times y)}\right)+\text{penalty function} \quad (۱)$$

$$\text{penalty function}=((GWQ_{max})^2\times\alpha)+((GWQ_{min})^2\times\beta)+((WT_{max})^2\times\gamma) \quad (۲)$$

www.SID.ir

Archive of SID

$$GWQ_{max}=\begin{cases}\text{if} & Q - Q_{max} \le 0 \quad , \quad 0\\ \text{else} & Q - Q_{max}\end{cases} \qquad (۳)$$

$$GWQ_{min}=\begin{cases}\text{if} & Q - Q_{min} \ge 0 \quad , \quad 0\\ \text{else} & Q - Q_{min}\end{cases} \qquad (۴)$$

$$wtcp=\frac{Q - Q_P}{A\times S_y} \qquad (۵)$$

$$wtct=\begin{cases}\text{if} & wtc \le 0 \;\&\&\; wtcp < 0 \quad , \quad wtc + |wtcp|\\ \text{elseif} & wtc \le 0 \;\&\&\; wtcp > 0 \quad , \quad wtc - wtcp\\ \text{elseif} & wtc > 0 \;\&\&\; wtcp \le 0 \quad , \quad wtc + |wtcp|\\ \text{elseif} & wtc > 0 \;\&\&\; wtcp > 0 \quad , \quad wtc - wtcp\end{cases} \qquad (۶)$$

$$WT_{max}=\begin{cases}\text{if} & |wtct| - \Delta L_{MAX} \le 0 \quad , \quad 0\\ \text{else} & |wtct| - \Delta L_{MAX}\end{cases} \qquad (۷)$$

مقدار Q حجم مصـــارف آب زیرزمینی (میلیون متر مکعب) و متغییر تصـــمیم می‌باشـــد. همچنین ΔL_{MAX} حداکثر مجاز تغییرات تراز آب زیرزمینی (متر)، m تعداد ماه و y تعداد ســال می‌باشـــند. در این مطالعه با توجه به آمار و اطلاعات ماهانه و سالانه تغییرات تراز آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه، شرایط آبخوان، حـداکثر مجـاز تغییرات تراز آب زیرزمینی، ΔL_{MAX} برابر ۰/۰۴ متر در ماه در نظر گرفته شـد. 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 می‌با شد. طبری و یزدی (۲۴)، در تحقیقی در مورد بهره‌برداری تلفیقی از م نابع آب ســـطحی و زیرزمینی با رویکرد انتقال آب بین حوضـــه‌ای، مقدار حداکثر مجـاز تغییرات تراز آب زیرزمینی ۰/۰۵ متر در مـاه در نظر گرفتند. صـــادقی طبس و همکاران (۲۵)، در تحقیق خود با اســـتفاده از الگوریتم‌های بهینه‌ســـازی تک و چند هدفه، مقدار حداکثر مجاز تغییرات تراز آب زیرزمینی ۰/۴۰ متر در ســال در نظر گرفتند. در این محاسبات حجم مصارف آب زیرزمینی بهینه در بخش‌های شرب، صنعت و ک شاورزی Q، متغییر ت صمیم و Q_p حجم مصـــارف آب زیرزمینی فعلی می باشـــد. م عاد له penalty function تـابع جریمـه بوده و در صـــورتی کـه محدودیت‌های حداکثر و حداقل حجم مصـــارف GWQ_{max} و GWQ_{min} ، حـداکثر تغییرات تراز آب زیرزمینی WT_{max} رعایت نشـود، مقادیر جریمه آن‌ها توسـط تابع جریمه محاسـبه می‌شوند و در نهایت به تابع هدف افزوده می‌شود. حداکثر حجم مصـــارف آب زیرزمینی Q_{max} برابر مقدار فعلی و حداقل حجم م صارف آب زیرزمینی Q_{min} برابر ۶۰ در صد حالت فعلی برآورد شده اند. حداقل حجم مصارف بر اساس شرایط منابع و مصارف محدوده مورد مطالعه، محاسـبه شـد. ضـریب ثابت α و β برابر ۱۰ و γ نیز برابر ۱۰۰۰۰ در تابع جریمه اول نظر گرفته شـــده 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، اســـتاندارد (کل مواد جامد محلول) به منظور بهینه سازی TDS آب زیرزمینی با توجه به ا ستاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO) و استاندارد سازمان خوار و بار جهانی (فائو)، همچنین با توجه به شـــرایط کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی و نیز اهداف مدل بهینه‌ســـازی، ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد. بر ا ساس روابط زیر کیفیت بهینه آب زیرزمینی محا سبه شده ا ست. مطابق رابطه (۸)، z_2 تابع هدف دوم می‌باشـــد. همچنین، C_{sta} کیفیت اســـتاندارد TDS آب زیرزمینی، می‌باشـــند. تابع جریمه penalty function مقدار جریمه‌ای می‌باشـــد که در صـــورت عدم رعایت کیفیت آب زیرزمینی محاسـباتی به اندازه مقدار اسـتاندارد و یا کمتر از آن، محاسبه شده و به تابع هدف دوم افزوده می‌شود. در تابع جریمه دوم ضریب ثابت ω ، برابر ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد.

www.SID.ir

Archive of SID

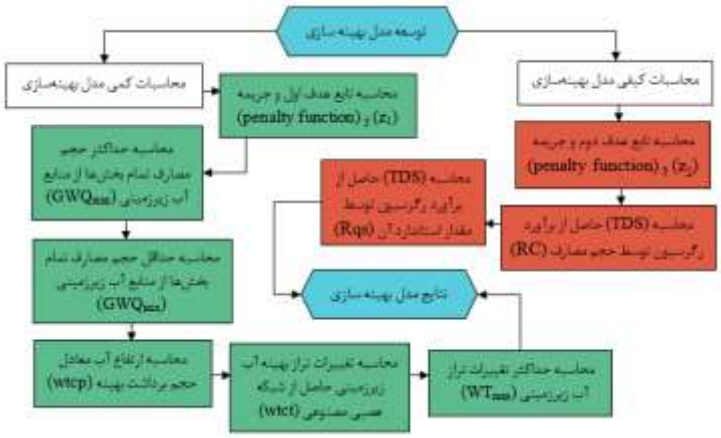
$$Z_2=\text{Minimize}\left(\frac{\sum_t^{nt}(RC)}{(C_{sta}\times m\times y)}\right)+\text{penalty function} \quad (۸)$$

$$\text{penalty function}=((Rqs)^2\times\omega) \quad (۹)$$

$$RC=243.729+(6.502\times Q) \quad (۱۰)$$

$$Rqs=\begin{cases}\text{if} & RC-C_{sta}\le 0 \quad , \quad 0\\ \text{else} & RC-C_{sta}\end{cases} \quad (۱۱)$$

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 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 بهینه سازی را نمایش می‌دهد.



شکل۳- 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

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 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

www.SID.ir

Archive of SID

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 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.

جدول۲- 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	کل
۹۳	۲۳۰/۳۵	۵۹/۹	۲۳۶/۶۱	۵۲۶/۸۶
۹۴	۲۲۶/۱۴	۵۷/۶	۲۴۲/۳۸	۵۲۶/۱۲
۹۵	۲۲۷/۱۹	۵۷/۳۹	۲۶۴/۶۷	۵۴۹/۲۵

تعیین تغییرات تراز و کیفیت بهینه آب زیرزمینی

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 دریان، استان فارس انجام شده و با استفاده از چارچوب مدل سازی Nash که شامل مدل شبیه‌سازی MODFLOW، شبکه 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،

www.SID.ir

Archive of SID

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 می باشد. 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 می شود. نتایج تحقیق رضایی و صفوی (۳۱) نشان داد که کاهش تجمعی سطح آب زیرزمینی به طور قابل توجهی در کل دوره برنامه‌ریزی کاهش می یابد و منجر به پایداری سفره آب زیرزمینی می شود، 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 ۶۹۴/۶۶ و ۳۸۲/۷۴ میلی گرم بر لیتر بوده که به میزان ۲۱/۷۶ و ۱۲/۲۸ درصد 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 می شود، مدیریت کیفیت سیستم‌های آبی را با عملکرد بالاتری انجام داد.

جدول۳- 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	بهینه
۹۳	-۹/۶۸۶	-۹/۶۸۹	-۰/۵۴۳
۹۴	-۴/۸۳	-۴/۸۳	۴/۳۰۲
۹۵	-۴/۶۳۲	-۴/۶۲۸	۴/۹۰۷

نتیجه گیری

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. 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

www.SID.ir

Archive of SID

مصـــنوعی بر اســـاس معیارهای ارزیابی مورد نظر، دارای دقت مناســـب و قابل قبول بوده که این امر منجر به افزایش دقت و اعتبار نتایج حا صل از مدل شبیه ساز- بهینه ساز شده ا ست. همچنین الگوریتم ژنتیک چند هدفه (NSGA-II) با توجه به محدودیت تغییرات تراز و کیفیت آب زیرزمینی بهترین مجموعه جواب را محاســـبه نموده و بر اســـاس آن بهترین مقادیر بهینه مورد نظر برآورد شده و سپس با توجه به نتایج مورد نظر، الگوی مدیریت بهینه آبخوان تدوین شـــده اســـت. در این تحقیق مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز، سیاست بهره‌برداری بهینه را طوری تعیین نموده که علاوه بر ایجاد تناسب بین حجم بهره‌برداری 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 شـــده اســـت. با توجه به نتایج تحقیق مورد نظر، پیشـــنهاد می‌شـــود که در بهره‌برداری بهینه از منابع آبی اولویت منابع و مصارف رعایت شده و به دلیل این که مصـــارف عمده از منابع آبی مربوط به بخش کشـــاورزی می‌باشـــد ســـطح زیر کشـــت محصـــولات کشـــاورزی متناســـب با مصـــارف آبی کاهش پیدا کند و از محصـــولاتی که نیاز به آب کمتری نسبت به سایر محصولات دیگر دارند ا ستفاده 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 مو ضوع، تحقیق حا ضر با ارائه روش شبیه ساز- بهینه ساز و سیا ست بهره‌برداری بهینه، می‌تواند همزمان از چند عامل موثر پشـــتیبانی کند و مســـائل و مشـــکلات کمی و کیفی آبخوان را کاهش دهد و منجر به افزایش پایداری منابع آب زیرزمینی شود و به این صورت از بروز م شکلات پیچیده تر جلوگیری به عمل آورد. بنابراین مدل مورد نظر به عنوان یک ابزار کاربردی با عملکرد مناســـب و دقیق و نیز کم هزینه و با سرعت مطلوب توصیه می‌شود.

References

1. Rajaee, T., Ebrahimi, H. and Nourani, V., 2019. A review of the artificial intelligence methods in groundwater level modeling. Journal of hydrology, 572, pp.336-351.
2. Banerjee, P., Singh, V.S., Chatttopadhyay, 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 ofgroundwater 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

www.SID.ir

Archive of SID

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. Nouiri, 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 environmental management, 234, pp.115-130.
14. Yu, X., Sreekanth, J., Cui, T., Pickett, T. and Xin, P., 2021. Adaptative 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 Esmaeelzade, 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.

www.SID.ir

Archive of SID

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 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.

www.SID.ir