

Research Paper

Optimizing the Cost of Pumping of Urban Drinking Water Wells Using The PSO Algorithm

Masoud Abdi¹, Hossein Ebrahimi^{2*}, Abolfazl Akbarpour³

1. Department of Civil Engineering, Kish International Branch, Islamic Azad University, Kish Island, Iran

2. Department of water science and Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3. Department of Civil Engineering, Birjand of University, Birjand, Iran

Received: 2020/08/19

Revised: 2020/12/10

Accepted: 2020/12/16

Use your device to scan and read the article online



DOI:

10.30495/wej.2021.25766.2261

Keywords:

Groundwater, Particle Optimization Algorithm, pumping,

Abstract

Introduction: Innovation of new technologies and use of advanced hydraulic methods in porous environment has contributed a lot in solving and optimizing groundwater related issues. Using these methods in some areas that drinking water is supplied through groundwater reserves will help a lot in economic optimization. The interaction effect of pumping costs and water consumption must be controlled and optimized. Supplying drinking water from underground water resources must be done according to a precise pre-designed plan so that it is optimized for both pumping and energy costs and water should be delivered to the consumer at a reasonable price and with optimal energy consumption.

Methods: In this study particle swarm metaheuristic algorithm (PSO) was used to optimize the pumping of groundwater wells that supply drinking water. The data of rate of shortage of statistic surface and the required cost were used for pumping in the Mashhad drinking water supply wells. The results show that by using the PSO algorithm, in addition to providing problem constraints, water extraction could be reduced.

Findings: Results show that by keeping the number of wells the same in the current design and by applying this algorithm the cost of pumping is reduced by 4.3%. The results of sensitivity analysis also show that for a certain amount of water with a 100% increase in pumping rates with two wells, the water demand will be provided and the total costs will be reduced by about 56 percent. Also by reducing the pumping rate the number of required wells for supplying certain water needs has increased to seven and the total costs will be increased by 26 percent.

Citation: Abdi M, Ebrahimi H, Akbarpour A. Optimizing the cost of pumping of urban drinking water wells using The PSO Algorithm. Quarterly Journal of Women and Society. Water Resources Engineering Journal. 2021; 14(49): 59- 71.

***Corresponding author:** Hossein Ebrahimi

Address: Associate Professor of of water science and Engineering Department, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Tell: 09128336286

Email: ebrahimi165@yahoo.com

Extended Abstract

Introduction

Groundwater is one of the main sources for meeting water needs in arid and semi-arid regions of the world. The existence of more than 600,000 water wells in alluvial aquifers in Iran indicates the consumption of a significant portion of groundwater resources for agricultural, drinking, sanitary, and industrial purposes. One of the important issues in groundwater resource management is to determine the appropriate location for drilling wells and the appropriate number and rate of pumping for them so that these wells meet water needs, including agricultural, industrial, and drinking water. Given the need to use new optimization techniques and supply drinking water at the cost of optimum pumping, in this study, the particle swarm optimization (PSO) algorithm is used as an efficient solution to determine the optimal location and pumping flow rate of wells

Methods

The PSO algorithm was first introduced by Eberhart and Kennedy in 1995. This algorithm is used as an effective and efficient method to solve optimization problems. In this study, the PSO algorithm is used to optimize the location and pumping rate of groundwater wells. The proposed model is analyzed using the data of the Mashhad Water Supply Master Plan. For this purpose, the number and location of wells supplying drinking water as well as the total annual extraction are determined by examining the total number of wells in the study area. The current model without drinking water wells is first simulated. The PSO model is then used to optimize the location and capacity of drinking water wells to fully meet the water needs.

The objective function is defined as a cost minimization function. There are limitations to the flow rate, pumping capacity, and hydraulic conductivity of the aquifer in the optimization process. Pumping costs such as drilling, casing, energy, and well development costs are added to the optimization constraints. The parameters of the well that affect costs are

considered as objective function variables. In this study, the data of Mashhad Plain, which is part of the Kashfarud River watershed, are used. Mashhad is located in Khorasan Razavi Province in northeastern Iran. The studied plain is located in a catchment basin with a longitude of $59^{\circ} 20'$ to $60^{\circ} 08'$ and a latitude of $35^{\circ} 40'$ to $36^{\circ} 03'$ and is limited to Hezar Masjed Mountains from the north, the Jamrud River watershed from South, and the Atrak River watershed from the west.

Findings

The objective function of the problem is expressed as a cost minimization function. The costs considered in the function include the costs of wells (water drilling, equipment, and casing, pumping, and annual energy), costs of water transfer to the destination (equipment and casing), and water treatment costs. The decision variables in this model are the coordinates (location) and pumping rate of the wells, the optimal combination of which creates the best mode (minimum cost). Changes in the coordinates of wells based on the variable thickness of the aquifer and different water quality in different areas will affect the cost of water extraction and treatment, respectively. On the other hand, with increasing distance from the place of consumption, transfer costs increase. Moreover, changing the pumping flow rate of wells is directly related to the cost of treatment and also affects the extraction costs by affecting the energy consumption of the pump in the water extraction process. The first step to solving the problem is to implement the objective function in the PSO model and determine the minimum and maximum values for the problem constraints based on the aquifer conditions. In this study, the total maximum pumping of existing wells is considered as the maximum extraction rate, the value of which is 46 thousand m^3 per year for the study area. Besides, the annual consumption rate is 159 thousand m^3 . The costs of the optimal design obtained by the PSO model are reduced by about 5% compared to the initial design. Examination of cost components indicates that the share

of drilling and water extraction costs is higher than other costs. It should be noted that the cost of treatment is lower than other costs due to limited water extraction, but it can be effective in the long run because it is exponential, unlike other costs.

Discussion

Increasing the maximum pumping flow rate in the problem and, consequently, assigning higher pumping rates to the wells by the model, require the use of more powerful pumps and costs more. On the other hand, the number of wells required to meet the water needs and the final cost decrease with the increase of the maximum pumping rate. According to the results, with a 100% increase in the maximum pumping rate and the allocation of two wells, water needs will be met and costs will be reduced by about 56%. Moreover, as the pumping rate decreases, the number of wells required to meet water needs increases to 7, and costs increase by 26%. The results indicate the high sensitivity of the model to the maximum pumping rate.

Conclusion

The results of the model suggest that the costs of drilling and water extraction are higher than other costs. Besides, the cost of treatment is small compared to other costs, but it will increase significantly in the long run. The cost of water extraction is reduced by using the PSO algorithm and observing the constraints of the problem. If the number of wells in the design in the model is considered the same, the pumping cost will be reduced by 4.2% using the PSO algorithm. Water needs can be met and total costs can be reduced by about 56% by increasing the pumping rate by 100%.

The model is implemented for the current situation, and it is found that water transfer costs will increase by 24.5% with the implementation of the model results. These costs will increase exponentially due to the high value of energy in the future. The total cost reduction for the base year will be 4.2%.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

Meteorological statistics were obtained from the website of the Meteorological Organization

Funding

No funding.

Authors' contributions

Design and conceptualization: Masoud Abdi
Supervision: Hossein Ebrahimi, Abolfazl Akbarpour

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی هزینه پمپاژ چاه‌های آب شرب شهری با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری PSO

مسعود عبدی^۱، حسین ابراهیمی^{۲*}، ابوالفضل اکبرپور^۳

۱. گروه عمران، واحد بین الملل کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، جزیره کیش، ایران

۲. گروه علوم و مهندسی آب، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳. گروه عمران، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

هدف: ابداع فن آوری های نو و بهره گیری از روش های پیشرفته و نرم افزارها در محیط متخلخل کمک زیادی در حل مسایل مرتبط با آبهای زیرزمینی و بهینه سازی آن کرده است. در مناطقی که آب شرب از طریق ذخایر آب زیرزمینی تامین میشود استفاده روشهای نوین در جهت بهینه سازی اقتصادی کمک زیادی خواهد کرد. هزینه های پمپاژ و میزان مصرف آب باید کنترل و بهینه شده و اثرات متقابل آنها بررسی می شود. تامین آب شرب از منابع آب زیرزمینی باید بر طبق یک برنامه دقیق از پیش طراحی شده انجام گیرد تا هم از نقطه نظر هزینه پمپاژ و هم از نظر انرژی بهینه شده و آب با قیمت مناسب و صرف انرژی بهینه به مصرف کننده تحویل شود.

روش: در این مطالعه از الگوریتم فراابتکاری ازدحام ذرات (PSO) به منظور بهینه سازی پمپاژ چاه های آب زیرزمینی که تامین کننده آب شرب هستند استفاده شد. از داده های میزان افت سطح ایستابی و هزینه ی مورد نیاز برای پمپاژ در چاه های طرح تامین آب شرب شهر مشهد استفاده شد. نتایج نشان می دهد که با بهره گیری از الگوریتم PSO علاوه بر تامین قیود مسئله، میتوان هزینه استحصال آب را کم کرد.

یافته ها: نتایج نشان میدهد که با یکسان نگه داشتن تعداد چاه در طرح موجود و با اعمال این الگوریتم هزینه پمپاژ ۴٫۳ درصد کاهش می یابد. همچنین نتایج تحلیل حساسیت نشان می دهد برای یک مقدار مشخص و ثابت آب، با افزایش ۱۰۰ درصدی نرخ پمپاژ با دو حلقه چاه نیاز آبی مورد نظر تامین می شود و هزینه های کل حدود ۵۶ درصد کاهش می یابد. همچنین با کاهش نرخ پمپاژ، تعداد چاه مورد نیاز برای تامین نیاز آبی مشخص به ۷ حلقه افزایش یافته و هزینه های کل ۲۶ درصد افزایش می یابد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۲۲

تاریخ داوری: ۱۳۹۹/۰۹/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۶

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

10.30495/wej.2021.25766.2261

واژه های کلیدی:

آب زیرزمینی، الگوریتم بهینه سازی دسته ذرات، پمپاژ، PSO

* نویسنده مسئول: حسین ابراهیمی

نشانی: دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تلفن: ۰۹۱۲۸۳۳۶۲۸۶

پست الکترونیکی: ebrahimi165@yahoo.com

مقدمه

یکی از منابع اصلی تامین نیازهای آبی در نواحی خشک و نیمه خشک در دنیا استفاده از آبهای زیرزمینی است. در ایران نیز وجود بیش از ۶۰۰ هزار حلقه چاه آب در آبخوان‌های آبرفتی حاکی از مصرف بخش قابل توجهی از منابع آب زیرزمینی برای مصارف مختلف کشاورزی، شرب و بهداشتی و صنعت است. حجم زیاد برداشت از منابع زیرزمینی با استفاده از روش‌های مختلف و عمدتاً از طریق حفر چاه‌های نیمه عمیق و عمیق انجام می‌شود. یکی از مسائل مهم در مدیریت منابع آب زیرزمینی تعیین محل مناسب برای حفر چاه، تعداد و نرخ پمپاژ مناسب برای آنها می‌باشد به گونه‌ای که این چاه‌ها بتوانند نیازهای آبی اعم از مصارف کشاورزی، صنعتی و آب آشامیدنی را تامین کنند. علاوه بر تامین نیازهای آبی، شرایط توسعه پایدار و شرایط زیست محیطی نیز بایستی مد نظر قرار گیرد [۱]. استفاده زیاد و بدون برنامه و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی از طریق چاه‌ها باعث افت سطح آب‌های زیرزمینی در دراز مدت شده و بیلان آب زیرزمینی را منفی می‌کند. همچنین اثرات نامطلوبی همچون کاهش سطح ایستابی، کاهش کیفیت آب، ورود آب‌های بی‌کیفیت به سفره، کاهش سطح آب جریان‌های سطحی همچون رودخانه‌ها و همچنین نشست زمین از اثرات استفاده بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی است. [۲].

سابقه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی با استفاده از فناوری‌های جدید حفر چاه در ایران به بیش از نیم قرن می‌رسد. طی این مدت نسبتاً طولانی شیوه‌نامه‌ها، دستورالعمل‌ها و راهنمایی‌هایی توسط متخصصین و کارشناسان صنعت آب در زمینه تعیین محل چاه‌ها و نحوه نظارت بر آنها تهیه و مورداستفاده قرار گرفته است. مطالعات و داده‌های اقلیمی مانند مقدار و شدت بارش، میزان تبخیر و حجم روان آب‌ها، می‌تواند تا حدودی محل مناسب حفر چاه را مشخص نماید. استفاده بررسی‌های زمین‌شناسی آبخوان و ضریب هدایت هیدرولیکی لایه اشباع و استفاده از سایر روشهای اکتشافی که به وسیله روش‌های ژئوفیزیکی انجام می‌شود نیز می‌تواند روشی برای تعیین محل حفر چاه باشد. تعیین دبی و عمق چاه نیز توسط روش‌های اکتشافی و آزمایشات پمپاژ مشخص می‌شود. [۳]

در استفاده از آب زیرزمینی رعایت مسائل اقتصادی، زیست‌محیطی و حقوقی، و در نظر گرفتن اثرات متقابل این داده‌ها و همچنین تهیه نقشه‌های کیفی آب زیرزمینی برای جانمایی بهینه چاه‌ها بسیار مشکل است. تعدد پارامترها و قیدهای زیادی که در تحلیل آب زیرزمینی وجود دارد رسیدن به جواب بهینه را دشوار و زمان‌بر می‌کند برای راحت شدن حل معادلات آب‌های زیرزمینی استفاده از روشها و الگوریتم‌های جدید اجتناب ناپذیر است. در روش‌های ابتدایی تحلیل آب زیرزمینی، پاسخ آبخوان به حفر چاه‌ها در نقاط پیش‌بینی شده، بطور کامل مشخص نبوده و میزان افت که از پارامترهای مهم جهت تعیین محل بهینه و میزان دبی پمپاژ چاه‌ها می‌باشد نامعلوم باقی می‌ماند. از طرف دیگر با توجه به هزینه‌های زیاد حفر چاه و هزینه‌های سالانه انرژی برای تامین آب نیاز است با استفاده از ابزارهای

بهینه‌سازی، مناسب‌ترین نقاط برای حفر چاه تعیین و با شیوه‌های بهینه‌سازی انرژی مصرف سالانه به حداقل برسد.

اهداف پژوهش

۱. بررسی امکان استفاده الگوریتم PSO در تعیین هزینه‌های پمپاژ
۲. تعیین هزینه پمپاژ بهینه
۳. تعیین نرخ پمپاژ بهینه

روش تحقیق

در این تحقیق با توجه به ضرورت استفاده از روش‌های جدید بهینه‌سازی و همچنین اهمیت تامین آب شرب با هزینه پمپاژ بهینه از الگوریتم PSO به عنوان راهکار کارآمد در تعیین محل و دبی بهینه پمپاژ چاه‌های بهره‌بردار استفاده شده است. الگوریتم ازدحام ذرات (Particle Swarm Optimization) PSO ابتدا توسط ابرهارت و کندی در سال ۱۹۵۵ معرفی شد. این الگوریتم به عنوان یک روش موثر و کارآمد در حل مسائلی بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ابتدا این الگوریتم بیشتر در حل مسائلی مهندسی برق و علوم کامپیوتر استفاده می‌شد و به مرور که نتایج قابل قبولی از این الگوریتم بدست آمد استفاده از آن در سایر علوم از جمله مهندسی عمران و مهندسی آب فراگیر گردید [۴].

داده‌های مورد استفاده در این مطالعه از داده‌های دشت مشهد که جزئی از حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود می‌باشد استفاده گردید. شهر مشهد در استان خراسان رضوی و در شمال شرق ایران قرار گرفته است. دشت مورد مطالعه در حوضه آبریز با طول جغرافیایی $36^{\circ}0'20''$ تا $35^{\circ}0'00''$ و عرض جغرافیایی $36^{\circ}0'30''$ قرار گرفته است و از شمال به ارتفاعات هزار مسجد، از جنوب به حوضه آبریز جام رود و از غرب به حوضه آبریز رودخانه اترک محدود می‌شود. شکل ۱، نقشه موقعیت محل مطالعه را نشان می‌دهد. میانگین مشخصات اقلیمی و منابع آب در استانی که مطالعه در آن انجام شده است در جدول شماره ۱ آورده شده است.

استان خراسان رضوی در بین استانهای ایران بالاترین رتبه بیلان منفی را داشته و سالانه حدود ۱۲۸۰ میلیون مترمکعب کسری مخزن دارد. این استان دارای ۳۷ محدوده مطالعاتی (دشت) می‌باشد که ۳۴ محدوده آن به علت کاهش شدید افت سطح آب زیرزمینی ممنوعه اعلام شده است که از بین آنها ۱۵ دشت ممنوعه بحرانی هستند. دشت مورد مطالعه در محدوده دشتهای ممنوعه بحرانی قرار دارد. مطالعه و پیشنهاد روشهای بهینه در آبهای زیرزمینی بخصوص در دشت‌هایی که با بحران آب مواجه اند میتواند در تعادل بخشی این دشت‌ها مفید واقع شود. در مطالعه حاضر دشت مشهد بعنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید.

در این تحقیق استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (Particle Swarm Optimization) PSO است که به اختصار الگوریتم PSO معرفی میشود استفاده شده است. هدف از این

ابتدا مدل بدون چاههای آب شرب فعلی شبیه سازی گردید و سپس برای بهینه سازی جانمایی و تعیین ظرفیت چاه های آب شرب، با هدف تامین کامل نیاز آبی از مدل PSO استفاده گردید.

تحقیق بهینه سازی مکان و نرخ پمپاژ چاه های بهره برداری از آب زیر زمینی بوده که برای آنالیز مدل از داده های طرح تامین آب شرب شهر مشهد استفاده میشود. بدین منظور با بررسی کل چاههای محدوده مطالعاتی، تعداد و موقعیت چاههای تامین کننده آب شرب و همچنین مجموع برداشت سالیانه در طول سال مشخص شده است.

جدول ۱: وضعیت منابع آبی در استان و ایران

واحد	ایران	استان مورد مطالعه	پارامتر
میلیمتر	۲۲۸	۲۲۵	بارش سالانه
میلیون متر مکعب	۴۰۰۰۰۰	۲۶۴۲۰	حجم سالانه بارش
میلیون متر مکعب	۲۷۰۰۰۰	۱۷۹۷۶	تبخیر تعرق
میلیون متر مکعب	۱۳۰۰۰۰	۸۹۴۴	منابع آب تجدید شونده
میلیون متر مکعب	۵۴۰۰۰	۶۶۸۴	سهم آب زیرزمینی
تعداد	۷۳۴۰۰۰	۳۲۵۳۵	تعداد چاه، قنات و چشمه

ماخذ: وزارت نیرو، شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی

محدودیت‌های بهینه سازی اضافه شدند. پارامترهای چاه که در هزینه موثر هستند به عنوان متغیرهای تابع هدف مشخص شده اند این پارامترها در جدول شماره (۲) آورده شده است.

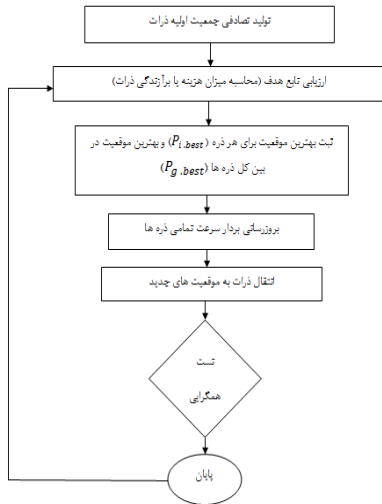
تابع هدف در این مطالعه به صورت یک تابع کمینه سازی هزینه بیان شده است. محدودیت‌های سرعت جریان، ظرفیت پمپاژ و هدایت هیدرولیکی آبخوان در فرآیند بهینه سازی وجود دارد. هزینه های پمپاژ، مانند هزینه حفاری، لوله گذاری، انرژی و توسعه چاه به

جدول ۲: پارامترهای هزینه ای تابع هدف

علامت	آیتم	نوع هزینه
M1	تجهیز و برچیدن کارگاه برای حفاری تا ۱۰۰۰ متر، با دستگاه حفاری ضربه ای.	ثابت
M2	تجهیز و برچیدن کارگاه برای آزمایش پمپاژ یا چاه پیمایی.	ثابت
T1	حمل دستگاه حفاری ضربه ای به هر تعداد و متعلقات مربوط و پرسنل برای حفاری تا ۱۰۰۰ متر	ثابت
T2	حمل لوله	ثابت
D	حفاری به روش ضربه ای بسته به قطر	ثابت
DD	تهیه لوله جدار	ثابت
DQ	تهیه لوله آبد	ثابت
P	پمپ کیلووات	ثابت
E	تجهیزات برقی بر حسب کیلووات	ثابت
MP	نصب پمپ	ثابت
MDD	نصب لوله جدار	ثابت
MDQ	نصب لوله آبد	ثابت
F	فیلتر گذاری	ثابت
TE	آزمایش چاه	ثابت
EY	انرژی سالانه	سالانه
PP	نیروی انسانی	سالانه
FO	استهلاک	سالانه
	سایر	سالانه

مکان خود را بر اساس موقعیت همسایگان و موقعیت خود و بهترین مکانی که میتواند قرارداد داشته باشد، تنظیم میکند. [۱۵] و [۴] تعداد ذرات یا جمعیت اولیه با توجه به شرایط مسئله و پارامترهای درگیر در مسئله تعیین می شود. بطور تجربی انتخاب جمعیت اولیه ذرات بین ۲۰ تا ۳۰ ذره مناسب خواهد بود البته میتوان تعداد ذرات را کمی بیشتر از حد لازم نیز در نظر بگیریم تا حاشیه امنی در مواجهه با حداقل های محلی بوجود آید. هر ذره با بردار سرعت $V_i(t)$ از محل قبلی خود به محل جدید میرسد در محل جدید میتواند با بردار سرعتی به سمت بهترین محلی که تاکنون در آنجا بوده حرکت نماید

الگوریتم PSO برای بار اول توسط ابرهات و کندی در سال ۱۹۹۵ تعریف شد و در سال ۱۹۹۸ توسط کندی اصلاح شد. در اصلاحیه توضیح داده شد که هر ذره نماینده یک جواب که بصورت تصادفی در مجموعه فضای جوابها قرار دارد خواهد بود. تغییر مکان هر ذره میتواند در موقعیت بقیه ذرات تاثیر گذار باشد لذا موقعیت ذرات دیگر گروه میتواند در چگونگی جستجوی یک ذره موثر باشد. نتیجه رفتار گروهی در این مدل منجر به جستجویی خواهد شد که ذرات به سمت نواحی مناسبتر حرکت کنند. اساس PSO بر این است که هر ذره،



شکل ۱ مراحل اجرای الگوریتم PSO

مدل بهینه سازی مکان و نرخ پمپاژ چاه ها (تابع هدف)

تابع هدف مسئله به صورت یک تابع کمینه‌سازی هزینه بیان گردید. هزینه‌های در نظر گرفته‌شده در این تابع شامل هزینه های چاه (حفر) و تجهیز و لوله گذاری چاه، هزینه پمپاژ و انرژی سالانه، هزینه مربوط به انتقال آب تا مقصد (تجهیز و لوله‌گذاری) و هزینه های مربوط به تصفیه آب میباشند. متغیرهای تصمیم در این مدل مختصات (محل) و نرخ پمپاژ چاه‌ها می باشد که ترکیب بهینه آنها باعث ایجاد بهترین حالت (کمترین هزینه) میگردد. تغییر مختصات چاه‌ها با توجه به ضخامت متغیر آبخوان و همچنین کیفیت متفاوت آب در مناطق مختلف، به ترتیب در هزینه‌های استخراج و تصفیه آب تاثیرگذار خواهد بود و از طرفی با فاصله گرفتن از محل مصرف هزینه های انتقال افزایش خواهد یافت. تغییر دبی پمپاژ چاه‌ها نیز با هزینه تصفیه رابطه مستقیم داشته و همچنین با تاثیر بر روی انرژی مصرفی پمپ در فرایند استخراج آب، در هزینه های استخراج نیز موثر خواهد بود.

در این تحقیق به منظور برآورد هزینه های مربوط به حفاری، قطرچاه ۱۶ اینچ و قطر لوله آبد ۱۰ اینچ انتخاب و تابع هزینه حفاری براین اساس تعریف میشود. همچنین با در نظر گرفتن حداکثر نرخ پمپاژ و با فرض کارکرد پمپ به مدت ۲۰۰ روز در سال، پمپ مناسب انتخاب و هزینه خرید آن نیز در تابع هزینه اعمال شده است. تابع نهایی هزینه استخراج در طول یک سال به شکل رابطه (۱) می‌باشد. در این رابطه dep عمق چاه است.

و یا به سمت بهترین محلی که کل گروه پیدا کرده است حرکت نماید و یا اینکه به مسیر خود ادامه دهد. بدیهی است که هیچیک از انتخابها به تنهایی مناسب نخواهد بود و ذره باید ترکیبی از مسیرهای بالا را انتخاب نماید. بردار جدید سرعت از رابطه (۱) محاسبه میشود.

$$V_i(t+1) = a * V_i(t-1) + b_1 * m_1 * (L_i(t) - X_i(t)) + b_2 * m_2 * (L_g(t) - X_i(t)) \quad (1)$$

در معادله بالا:

a و b_1 و b_2 ضرایب ثابت و m_1 و m_2 بردارهای تصادفی بین صفر و یک است.

L_i موقعیت محلی که ذره X تا کنون داشته و L_g موقعیت بهترین محل ممکن برای کل ذرات و مقدار a کمتر از یک انتخاب میکنیم زیرا اگر بزرگتر از یک انتخاب شود، $V(t)$ دائماً افزایش می یابد تا جایی که واگرا گردد. در مطالعه حاضر مقدار این ضریب را مثبت و در رنج ۰٫۷ تا ۰٫۸ در نظر می‌گیریم. b_1 و b_2 نیز در این مطالعه مثبت و در رنج ۱٫۵ الی ۱٫۷ در نظر گرفته شده است. [۱۶]

موقعیت جدید هر ذره با توجه به موقعیت هر عضو از جمعیت باید بر یک گره منطبق باشد و بصورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$X_i(t+1) = Round(X_i(t) + V_i(t+1)) \quad (2)$$

در این رابطه $X_i(t)$ موقعیت قبلی و $X_i(t+1)$ موقعیت فعلی ذره است.

مدل تهیه شده برای این مطالعه شامل دو قسمت مدل سازی و بهینه سازی خواهد بود که در تلفیق این دو بخش سعی بر آن است تا ارتباط قوی و مؤثری بین مدل سازی و بهینه سازی با شرط حداقل کردن میزان خطا برقرارگردد. در مطالعه حاضر با استفاده از روش عددی ویژگی های آبخوان با بیش ترین دقت وارد مدل بهینه سازی شده است. نتایج خروجی مدل آبهای زیرزمینی پس از آماده سازی، وارد الگوریتم بهینه سازی فرا ابتکاری با کد نویسی در نرم‌افزار MATLAB مورد تحلیل قرار گرفته و این کار تا پیدا شدن و همگرا شدن به جواب بهینه تکرار شد تا بهترین جواب بهینه بدست آید.

بطور کلی در اجرای الگوریتم PSO ابتدا یک جمعیت تصادفی از ذرات ایجاد میشود و هر ذره در جامعه دارای مجموعه ای از متغیر هاست که باید مقدار آن بهینه شود. تعیین بهترین ذره و بهترین موقعیتی که تا کنون داشته است مرحله بعدی اجرای الگوریتم است

همچنین $dep \leq 50$ به رابطه (۱) بردار سرعت برای تمامی ذرات به روز رسالتی میدهد تا بهترین موقعیت ۵۶۹۰۰ فر ۳۰۰۰۰ $dep \leq 100$ شکل (۲) مراحل اجرای الگوریتم نشان داده شده است.

میشود. همچنین تعداد n چاه، i شمارنده چاه و توابع p_1, p_2, p_3 به ترتیب توابع جریمه مربوط به قیود محدودیت شامل، افت، تامین نیاز آبی و حریم آبخوان می‌باشند که در قالب روابط زیر تعریف می‌گردند:

$$P_1 = \begin{cases} \alpha_1 \times (s_i - s_{max}), & s_i < s_{max} \\ 0, & s_i \geq s_{max} \end{cases} \quad (9)$$

$$s_{max} = H_0 - \frac{1}{3}T \quad (10)$$

$$P_1 = \left| \sum_{i=1}^n Q_i - Q_{demand} \right| \quad (11)$$

$$P_3 = \alpha_3 B \quad (12)$$

در روابط فوق s_i میزان افت تجمعی سطح آب زیرزمینی در محل چاه i ام بر حسب متر، s_{max} زمان حداکثر افت مجاز سطح آب زیرزمینی بر حسب متر، H_0 سطح اولیه آبخوان بر حسب متر، T ضخامت آبخوان بر حسب متر، Q_i نرخ برداشت از چاه i ام بر حسب مترمکعب در سال، Q_{demand} مقدار نیاز آبی بر حسب مترمکعب در سال، α_1, α_3 ضرایب توابع جریمه و B متغیر دودویی (Binary) که در صورت قرار گرفتن چاه‌ها در یک سلول یا سلول‌های غیرفعال یا سلول‌های مربوط به رودخانه یا مرزها و یا در حریم چاه‌های دیگر برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. لذا قیود مسئله شامل موارد زیر است:

$$X_{min} \leq X_i \leq X_{max} \quad (13)$$

$$y_{min} \leq y_i \leq y_{max} \quad (14)$$

$$Q_{min} \leq Q_i \leq Q_{max} \quad (15)$$

$$s_i \leq s_{max} \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^n Q_i = Q_{demand} \quad (17)$$

که در آن، X_i, y_i مختصات چاه i ام، $[X_{min}, X_{max}]$ دوده طولی فضای جستجو، $[y_{min}, y_{max}]$ دوده عرضی فضای جستجو، s_i میزان افت تجمعی سطح آب زیرزمینی در محل چاه i ام بر حسب متر، s_{max} زمان حداکثر افت مجاز سطح آب زیرزمینی بر حسب متر، Q_{min} و Q_{max} ترتیب حداقل و حداکثر نرخ پمپاژ مجاز بر حسب متر مکعب در سال است.

رابطه بالا f_2 میزان هزینه حفاری را بر حسب میلیون ریال محاسبه خواهد کرد. ارقام براساس فهرست بهای حفاری سال ۹۸ محاسبه شده است.

به منظور تعیین هزینه انرژی مصرفی (برق) ابتدا توان مورد نیاز پمپ با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شد. سپس با ضرب توان پمپ در مدت فعالیت آن (بر حسب ساعت) و در تعرفه انرژی (ریال بر کیلو وات ساعت)، هزینه نهایی انرژی محاسبه گردید.

$$f_2 (hp, Q) = 0.677 \times Q \times hp$$

در رابطه فوق، P توان مصرفی بر حسب کیلووات، hp ارتفاع مکش بر حسب متر، Q دبی پمپاژ بر حسب متر مکعب بر ثانیه و e راندمان پمپ است. در این مدل راندمان پمپ ۷۰ درصد در نظر گرفته شد. جهت برآورد هزینه‌های مربوط به انتقال با توجه به نرخ بیشینه پمپاژ، لوله ای با قطر ۶ اینچ از جنس پلی اتیلن به عنوان مبنای محاسبات قرار گرفته و عملیات متره و برآورد انجام شد. تابع هزینه انتقال آب در طول یک سال در رابطه (۶) نشان داده شده است.

$$f_3 (distance) = 0.354 \times distance + 23.1 \quad (6)$$

$$distance = \sqrt{(x_{target} - x_i)^2 + (y_{target} - y_i)^2} \quad (7)$$

در روابط ذکر شده $distance$ فاصله مستقیم محل حفر چاه تا نقطه مقصد می‌باشد که از طریق رابطه (۷) محاسبه می‌گردد. در این رابطه x_{target}, y_{target} مختصات چاه i ام و x_i, y_i مختصات نقطه مقصد می‌باشند. مقدار بدست آمده f_3 هزینه انتقال بر حسب میلیون ریال می‌باشد. مقدار مواد جامد محلول در آب (TDS) به عنوان شاخص کیفیت آب در نظر گرفته شده است و در تمامی قسمت‌ها منظور از تصفیه آب، کاهش مقدار TDS تا مقدار مجاز برای استفاده مورد نظر (شرب) می‌باشد. در این تحقیق فرض شده است که کیفیت آب چاه‌های شرب در حد استاندارد آب شرب بوده و لذا در تابع هدف هزینه ای برای تصفیه آب در نظر گرفته نشده است. مدل ریاضی تابع هدف بعد از اضافه شدن تابع جریمه به شکل زیر می‌باشد.

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^n \{f_1(dep_i) + f_2(hp_i, Q_i)\} + \sum_{i=1}^n f_3(distance) + p_1 + p_2 + p_3 \quad (8)$$

در رابطه فوق f_1 تابع هزینه حفاری، f_2 تابع هزینه مصرف انرژی، f_3 تابع هزینه انتقال آب بوده که طبق روابط (۱) تا (۸) محاسبه

پیشینه تحقیق

در مطالعه ای روش ازدحام ذرات PSO با هدف بهینه سازی چند هدفه در منابع آب معرفی و برای اهداف بهینه کردن نیاز آبی سالانه ، بهینه کردن تولید انرژی ، کمینه کردن خطر سیلاب و بهینه کردن قابلیت اطمینان سیستم از این الگوریتم استفاده شد نتایج نشان داد که دقت استفاده از این روش نسبت به روشهای تحلیلی دارای دقت بیشتری است. [۵]

از الگوریتم فرا کاوشی ژنتیک در مطالعه آبهای زیر زمینی نیز استفاده شده است در مطالعه ای با استفاده از الگوریتم فرا کاوشی ژنتیک با هدف کمینه سازی هزینه بهره برداری در آبخوان توانستند از میان تعداد زیادی از محلهای پیشنهادی حفر چاه ، نرخ پمپاژ و مکان چاه-ها را بهینه نمایند. [۶] همچنین جهت بهینه سازی فرایند بازیابی آبخوان با استفاده از الگوریتم ژنتیک محل چاه ها و نرخ پمپاژ به عنوان متغیرهای تصمیم در تابع هدف اعمال و متغیر بهینه محاسبه گردید. [۷]

در مطالعه ای از ترکیب دو الگوریتم بهینه سازی ژنتیک و برنامه ریزی پویای تفاضلی مقید به حل مسئله جانمایی و تعیین نرخ پمپاژ و تعداد بهینه چاه‌های بهره برداری جهت تامین نیازهای آبی استفاده گردید. در این تحقیق هزینه احداث چاه به صورت هزینه ثابت و هزینه پمپاژ به صورت وابسته به زمان در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که اعمال هزینه ثابت در تابع هدف تاثیر زیادی در تعیین تعداد بهینه چاه ها خواهد گذاشت. [۸]

در مطالعه‌ای دیگر نیز به حل مسئله جانمایی و تعیین نرخ پمپاژ بهینه چاه ها در آبخوان ساحلی پرداخته شد با این تفاوت که آنها برای مدلسازی هجوم آب شور از روش المان مرزی استفاده کردند. آنها مدل مذکور را با الگوریتم ژنتیک تلفیق کرده و جهت حل مسئله استفاده کردند [۹]

تلفیق مدل‌های شبیه سازی Analytic Element Method (AEM) و بهینه سازی PSO و توسعه مدل شبیه سازی بهینه سازی در خصوص مدیریت آب زیرزمینی در حوضه رودخانه Dore فرانسه مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف این تحقیق حداکثر کردن میزان برداشت از آبخوان و حداقل کردن هزینه ها بود. نرخ پمپاژ و محل چاه‌های جدید در آبخوان بعنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شد و در نهایت متغیر بهینه برای آنها حاصل شد. [۱۰]

با ترکیب مدل جایگزین شبیه سازی ماشین های بردار پشتیبان و مدل بهینه سازی ازدحام ذرات، یک مدل شبیه سازی- بهینه سازی توسعه داده و از آن به منظور تعیین مکان و نرخ پمپاژ مناسب در عملیات بازیابی زیستی آبخوان استفاده کردند. در این تحقیق تعدادی چاه منتخب در نظر گرفته شده و از میان آنها بهترین محل و همچنین نرخ بهینه پمپاژ برای آنها به دست آمده است. [۱۱]

در مطالعه ای در از میر ترکیه مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم فرا کاوشی جستجوی هارمونی را توسعه دادند. هدف از مطالعه، جانمایی بهینه چاه های بهره برداری جدید و تعیین نرخ پمپاژ مناسب برای آنها به منظور تامین کلیه نیازهای آبی بود. نتایج نشان

داد که میتوان با استفاده از این مدلها هزینه حفر، تجهیز و پمپاژ از چاه‌های جدید در آبخوان را به حداقل رساند. همچنین با یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی بر مبنای الگوریتم تکامل تفاضلی مطالعه تکمیل گردید. آنها در این مسئله علاوه بر مسائل کمی مانند حداقل کردن هزینه‌ها، اهداف کیفی را هم وارد مدل کردند. [۱۲]

در مطالعه ای مدل تلفیقی شبیه‌سازی عددی و بهینه‌سازی به روش جامعه مورچه‌ها در محیط های پیوسته و با اعمال راهبرد Elitist برای مدیریت بهینه آبخوان‌های ساحلی دریا ارائه گردید. تابع هدف مدل بهینه سازی، حداکثر نمودن مقدار پمپاژ از سلول های موجود در آبخوان ساحلی بود، طوری که از پیشروی آب شور دریا به آنها ممانعت به عمل آید. پمپاژ از آب زیرزمینی، به عنوان متغیر تصمیم گیری مدنظر بوده و از سلول های از پیش انتخاب شده، انجام پذیرفت. [۱۳]

در مطالعه‌ای دیگر به منظور مدیریت بهره برداری بهینه از آبخوان دشت ساحلی ارومیه و تعیین نرخ بهینه پمپاژ چاه‌های بهره برداری از یک مدل شبیه سازی-بهینه‌سازی استفاده گردید. در این مطالعه ابتدا جریان آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعاتی شبیه سازی شد، سپس نرخ پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری با توجه به هدف مورد نظر (کمینه سازی نرخ پمپاژ چاه‌های بهره برداری) و با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه گردید. [۱۴]

در سال ۲۰۱۵، سائیراک و راستگویی یک مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز به منظور استخراج یک برنامه بهینه بهره‌برداری ارائه کردند. آبخوان مورد استفاده آن‌ها یک آبخوان فرضی محصور، ناهمگن و غیر ایزوتروپ بوده که هندسه نامنظمی دارد. هدف بهینه‌سازی آن‌ها پیدا کردن تعداد چاه‌های بهره‌برداری بود به نحوی که مقدار افت سطح آب زیرزمینی با توجه به قوانین و هزینه‌های مربوط به برداشت آب حداقل شود. لازم به ذکر است از روش عددی المان محدود جهت شبیه‌سازی و الگوریتم ازدحام ذرات جهت بهینه‌سازی استفاده کردند. صادقی طیس و همکاران (۲۰۱۶) روش جستجوی چندگانه الگوریتم ژنتیک سازگار (آمالگام) را جهت بهینه‌سازی موقعیت چاه‌ها و نرخ پمپاژ مورد استفاده قرار دادند. در این مطالعه نرخ پمپاژ همراه با سه هدف کمینه سازی، یعنی حداقل کمبود ناشی از عدم عرضه، تغییر شاخص کمبود و کمینه شدن میزان تخلیه در مناطق تعیین شده، برای تعیین یک راه حل بهینه جهت تخلیه و تغذیه آب های زیرزمینی انتخاب شد. مدل شبیه‌سازی آن‌ها تفاضل محدود و در محیط GMS بود. به طور کلی نتایج نشان داد که روش مدل سازی بهینه‌سازی-شبیه‌سازی توانست مجموعه‌ای از راه حل‌های بهینه را که در یک جبهه پارتو نمایش داده می‌شد، محاسبه کند (۲۰)

یافته‌های پژوهش

پیاده‌سازی تابع هدف در مدل PSO و تعیین مقادیر حداقل و حداکثر مربوط به قیدهای مسئله بر اساس شرایط آبخوان ، اولین مرحله در حل مسئله است. در این مطالعه مجموع حداکثر پمپاژ چاه های موجود بعنوان نرخ حداکثر برداشت در نظر گرفته شده است. این مقدار برای منطقه مورد مطالعه ۴۶ هزار مترمکعب در سال است همچنین مقدار مصرف سالانه معادل ۱۵۹ هزار مترمکعب در نظر گرفته شده است.

هزینه‌ها نشان می‌دهد که سهم هزینه حفاری و استخراج آب نسبت به دیگر هزینه‌ها بیشتر بوده است. قابل ذکر است که هزینه تصفیه با توجه به محدود بودن برداشت آب نسبت به دیگر موارد مقدار کمتری دارا می‌باشد اما به دلیل اینکه هزینه آن برعکس موارد دیگر به صورت تصاعدی است، در درازمدت می‌تواند تاثیرگذار باشد.

با توجه به شرایط مسئله و میزان اهمیت پارامترها، نتایج تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای هدایت هیدرولیکی و نرخ بیشینه برداشت ارائه شده است. به منظور تحلیل میزان حساسیت هدایت هیدرولیکی، این پارامتر با ۵۰٪ افزایش و ۵۰٪ کاهش نسبت به شرایط اصلی مسئله حل گردید. مقادیر جواب‌ها و نمودار همگرایی هزینه طرح در بهترین مقدار تابع هدف در جدول شماره ۵ نشان داده شده است.

پارامترهای مربوط به الگوریتم *PSO* مطابق جدول و مقادیر ضرایب توابع جریمه نیز با انجام آزمون و خطا 10^8 تعیین گردیدند. اطلاعات ۴۰ حلقه جاه مشاهداتی ثبت و با استفاده از محیط *Arcgis* نقشه هدایت الکتریکی منطقه رسم گردید.

پس از انجام تمامی مراحل آماده سازی، مدل *PSO* اجرا گردید که نتایج حاصل از ۱۰ بار اجرای مدل در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین نمودار همگرایی بهترین مقدار تابع هزینه در شکل ۳ نشان داده شده است.

در شکل ۶ فاصله بین دو نمودار نشان دهند مقدار تابع جریمه می‌باشد و همانگونه که مشاهده می‌شود در تکرارهای اول به علت نقض شدن قیود مسئله سهم زیادی از مقدار تابع هدف مربوط به تابع جریمه می‌باشد ولی در ادامه مقدار تابع جریمه کاهش یافته و دو نمودار به هم نزدیک می‌شوند و در نهایت هر دو نمودار به دو نقطه مشخص با فاصله کمی از یکدیگر همگرا می‌شوند.

هزینه‌های طرح بهینه بدست آمده توسط مدل *PSO* نسبت به طرح اصلی حدود ۵ درصد کاهش داشته است. همچنین بررسی اجزای

جدول ۳: پارامترهای مربوط به الگوریتم *PSO*

ضریب شناخت (<i>C1</i>)	ضریب اجتماعی (<i>C2</i>)	ضریب وزن اینرسی (<i>w</i>)	عامل انقباض (<i>X</i>)	تعداد ذرات	حداکثر تعداد تکرار
2/25	1/75	0/4 - 1/2	0/9	25	300

جدول ۴: نتایج حاصل از ۱۰ بار اجرای مدل

نتایج	هزینه خالص
بهترین	۵۵۳/۷
بدترین	۶۴۶/۹
میانگین	۶۰۰/۷
انحراف معیار	۳۵/۷

جدول ۵. هزینه‌های طرح بهینه و طرح موجود (بر حسب میلیون تومان)

مشخصات	هزینه حفاری	هزینه انتقال آب	هزینه نمک زدایی	مجموع هزینه‌ها
طرح بهینه	۶۱۷,۳۱	۳۹۸,۶۲	۷۲,۵۸	۱,۰۸۸,۱۳
طرح در حال بهره‌برداری	۵۳۴,۸۵	۵۲۷,۸۲	۷۳,۳۰۲	۱,۱۳۶,۲
درصد افزایش یا (کاهش)	۱۵,۴	(۲۴,۵)	(۱)	(۴,۲)

جدول ۶. تحلیل حساسیت نرخ پمپاژ بیشینه

مشخصات طرح آبرسانی	هزینه خالص (میلیون تومان)	نسبت تغییرات
طرح بهینه	1,086.8	---
افزایش هدایت هیدرولیکی	1,058.3	% 2/5
کاهش هدایت هیدرولیکی	۱,۱۴۳,۸	% 2/5

تاثیر در هزینه پمپ انتخابی در هزینه نهایی تاثیرگذار خواهد بود در نتیجه تحلیل حساسیت مدل نسبت به آن ضروری است. بدین منظور مقدار نرخ پمپاژ در یک حالت دو برابر مقدار اولیه و در حالت دیگر نصف حالت مینا قرار داده شده و مسئله حل شده است. نتیجه حاصل شده در جدول ۶ و شکل ۵ نشان داده شده است.

افزایش دبی پمپاژ بیشینه در مسئله و در نتیجه اختصاص نرخ پمپاژ بالاتر توسط مدل به چاه‌ها، نیازمند استفاده از پمپ قوی‌تر و صرف هزینه بیشتر می‌باشد ولی از طرفی با بالا رفتن نرخ پمپاژ بیشینه،

همانگونه که مشاهده می‌شود، افزایش و کاهش مقدار هدایت هیدرولیکی آبخوان تاثیر چندانی در جواب نهایی ندارد و مدل نسبت به پارامتر هدایت هیدرولیکی آبخوان حساس نمی‌باشد.

مقدار نرخ پمپاژ بیشینه بستگی به مشخصات آبخوان دارد و بر اساس آزمایش افت پله‌ای تعیین می‌شود. در مسئله حاضر با فرض انجام آزمایش پمپاژ برای چاه‌های موجود در ناحیه مورد مطالعه، از اطلاعات و نرخ پمپاژ بیشینه آنها جهت حل مسئله استفاده شده است. تغییر پمپاژ بیشینه چاه با تاثیر در تعداد چاه‌های مورد نیاز و همچنین

تعداد چاه‌های مورد نیاز برای تامین نیاز آبی کاهش یافته و هزینه نهایی پایین آمده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ۱۰۰ درصدی نرخ پمپاژ بیشینه، با اختصاص دو حلقه چاه نیاز آبی مورد نظر تامین می‌شود و هزینه‌ها حدود ۵۶ درصد کاهش می‌یابند. همچنین با کاهش نرخ پمپاژ، تعداد چاه مورد نیاز برای تامین نیاز آبی به ۷ حلقه افزایش یافته و هزینه‌ها ۲۶ درصد افزایش می‌یابد. نتایج نشان دهنده حساسیت بالای مدل نسبت به نرخ پمپاژ بیشینه است.

نتیجه‌گیری

نتایج مدل نشان می‌دهد که سهم هزینه حفاری و استخراج آب نسبت به دیگر هزینه‌ها بیشتر است. همچنین هزینه تصفیه نسبت به دیگر موارد مقدار کمی بوده ولی در دراز مدت هزینه قابل توجهی خواهد بود. استفاده از الگوریتم PSO در علاوه رعایت محدودیت‌ها و قیود مسئله، باعث کاهش هزینه استحصال آب خواهد شد. چنانچه تعداد چاه در طرح موجود را در مدل هم یکسان در نظر بگیریم، با اعمال این الگوریتم از هزینه پمپاژ ۴٫۲ درصد کاسته می‌شود. با افزایش ۱۰۰ درصدی نرخ پمپاژ میتوان نیاز آبی را تامین نمود و هزینه‌های کل را حدود ۵۶ درصد کاهش داد. همچنین با کاهش دبی پمپاژ در مدل، به ۷ حلقه چاه نیاز خواهیم داشت که به تعداد چاه بیشتری نیاز بوده و برای تامین نیاز آبی مورد نظر هزینه‌های کل ۲۶ درصد افزایش می‌یابد.

مدل برای شرایط فعلی اجرا گردید و مشخص شد که با اعمال نتایج مدل هزینه‌های انتقال آب ۲۴٫۵ درصد افزایش خواهد یافت که با توجه به ارزش انرژی در آینده این هزینه‌ها تصاعدی زیاد خواهد شد. سرجمع کاهش هزینه برای سال پایه ۴٫۲ درصد خواهد بود.

In: Proc. of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science (MHS-1995), 4-6 October, Nagoya, Japan, 39-43.

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.470.3577&rep=rep1&type=pdf>

5. Baltar, a., and Fontane, D.G,(2004). A multiobjective particle swarm optimization model for reservoir operations and planning. Dept. of Civil and Environmental Engineering, Colorado State University, USA.

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?jsessionid=51FC25CE815E3F440E2CED24BE7ABB54?doi=10.1.1.83.2971&rep=rep1&type=pdf>

6. McKinney DC, Lin M-D (1994) Genetic algorithm solution of groundwater management models. Water Resources Research 30(6):1897

<https://doi.org/10.1029/94WR00554>

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

در مطالعه حاضر آمار هواشناسی از سایت سازمان هواشناسی کشور و داده‌های آبهای زیر زمینی از سازمان آب منطقه ای خراسان رضوی اخذ گردید.

حامی مالی

هزینه‌های مطالعه حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شد.

مشارکت نویسندگان

طراح و ایده این تحقیق: مسعود عبدی
نظارت و کنترل و ویرایش علمی: حسین ابراهیمی، ابوالفضل اکبر پور

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References

1. Elçi A, Ayyavaz MT (2014) Differential-evolution algorithm based optimization for the site selection of groundwater production wells with the consideration of the vulnerability concept. Journal of Hydrology 511:736–749.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169414000936>
2. Conkling H (1946) Utilization of ground-water storage in stream system development. Transactions of the American Society of Civil Engineers 111(1):275–305
<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/TACEAT.0005914>
3. Iran Ministry of Energy (2013) Standards code title 577. Iran Ministry of Energy Press, Tehran (In Persian).
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.470.3577&rep=rep1&type=pdf>
4. Eberhart RC, Kennedy J (1995) A new optimizer using particle swarm theory.

7. Huang C, Mayer AS (1997) Pump-and-treat optimization using well locations and pumping rates as decision variables. *Water Resources Research* 33(5):1001-1012.
<https://doi.org/10.1029/97WR00366>
8. Hsiao C-T, Chang L-C (2002) Dynamic optimal groundwater management with inclusion of fixed costs. *Journal of Water Resources Planning and Management* 128(1):57-65
https://www.oieau.org/eaudoc/system/files/documents/34/174775/174775_doc.pdf
9. Katsifarakis KL, Petala Z (2006) Combining genetic algorithms and boundary elements to optimize coastal aquifers management. *Journal of Hydrology* 327(1-2):200-207.
https://www.oieau.org/eaudoc/system/files/documents/34/174775/174775_doc.pdf
10. Gaur S, Chahar B R, Graillot D (2011) Analytic elements method and particle swarm optimization based simulation-optimization model for groundwater management. *Journal of Hydrology* 402(3-4):217-227
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.016>
11. Ch S, Kumar D, Prasad RK, Mathur S (2013) Optimal design of an in-situ bioremediation system using support vector machine and particle swarm optimization. *Journal of Contaminant Hydrology* 151:105-116
<https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2013.05.003>
12. Ayvaz ,Mt, Elçi A (2013) A groundwater management tool for solving the pumping cost minimization problem for the Tahtali watershed (Izmir-Turkey) using hybrid hs-solver optimization algorithm. *Journal of Hydrology* 478:63-76.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.045>
13. Ketabchi H, Ataie-Ashtiani B (2011) Development of Combined Ant Colony Optimization Algorithm and Numerical Simulation for Optimal Management of Coastal Aquifers. *Iran-Water Resources Research* 7(1):1-12
<https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=265079>
14. Nakhaei M, Mohammadi M, Rezaie M (2014) Optimizing of aquifer withdrawal numerical model using genetic algorithm (case study: Uromiyeh coastal aquifer). *Iran-Water Resources Research* 10(2):94-97 (In Persian)
http://iwrr.sinaweb.net/article_13442_2324.html?lang=en
15. Kennedy,J.(1998).The behavior of Particle, Porto,V. W., Saravanan, N., Waagen,D., and Eiben,A.e.(eds) ,In *Evolutionary Programming VII* , Springer ,581-590.
16. Arumugam,M.S, and M. V. C. Rao, "On the improved performances of the particle swarm optimization algorithms with adaptive parameters, cross-over operators and root mean square (RMS) variants for computing optimal control of a class of hybrid systems," *Applied Soft Computing Journal*, vol. 8(1), pp. 324-336, 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2007.01.010>
17. Ghasemi-Nejad A (2015) Multi-objective water resource allocation planning considering qualitative and quantitative goals (Case study: Doosti Reservoir). M.Sc. Thesis, Shahid Beheshti University (In Persian).
18. Chaudhry S (2003) Unit cost of desalination. California Desalination Task Force, California Energy Commission, Sacramento, California
19. Toossab Consulting Engineers Company (2013) National water plan main report (Fifth volume: eastern basins). Iran Ministry of Energy Press, Tehran (In Persian)
20. Sadeghi tabas S, Samadi SZ, Akbarpour A, Pourreza Bilondi M (2016) Sustainable groundwater modeling using single-and multi-objective optimization algorithms, *Journal of Hydroinformatics*, 18(5), pp. 1-18, 2016.
<http://dx.doi.org/10.2166/hydro.2016.006>