تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال دوازدهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۵
Volume 12, No. 2, Summer 2016 (IR-WRR)
۲۴-۳۷

طراحی جانمایی و ظرفیت بهینه چاه‌های برداشت از آبخوان با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی

علی قاسمی نژاد[۱] و مجتبی شوریان[۲*]

چکیده

جانمایی نامناسب چاه‌های بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی و برداشت بی‌رویه از آن‌ها، همواره تبعات اقتصادی فراوانی به همراه داشته و همچنین موجب خسارت‌های شدید به آبخوان می‌گردد. هدف این تحقیق توسعه یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، به منظور طراحی محل و ظرفیت بهینه چاه‌های بهره‌برداری با در نظر گرفتن ملاحظات کمی و کیفی آب می‌باشد. مدل مذکور با تلفیق مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی MODFLOW و الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات توسعه یافته و به منظور کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های حفاری چاه، انتقال و تصفیه آب در محدوده دشت سرخس واقع در شمال شرق ایران مورد استفاده قرار گرفته است. متغیرهای تصمیم مسئله مکان و نرخ پمپاژ چاه‌ها بوده و محدودیت‌های حداکثر نرخ پمپاژ و افت مجاز آبخوان به صورت قید در مدل با هدف تأمین نیاز آب شرب شهر سرخس لحاظ شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با بهره‌گیری از مدل PSO-MODFLOW، علاوه بر ارضای قیود مسئله میزان هزینه استحصال آب نسبت به طرح موجود در حال بهره‌برداری کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که هزینه کل در شبکه بهینه طراحی‌شده ۵۷۲۰ میلیون ریال و در طرح موجود با تعداد چاه یکسان برابر با ۵۹۸۰ میلیون ریال به دست آمده که بیانگر کاهش ۵ درصدی هزینه می‌باشد. همچنین نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که تغییرات پارامتر هدایت هیدرولیکی آبخوان تأثیر زیادی بر نتایج به دست آمده ندارد. در حالیکه تغییرات نرخ پمپاژ بیشینه با تأثیر مستقیم در تعداد چاه‌های مورد نیاز باعث تغییرات قابل ملاحظه‌ای در هزینه نهایی می‌شود.

کلمات کلیدی: چاه‌های برداشت از آبخوان، طراحی جانمایی و ظرفیت بهینه، رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، MODFLOW، PSO.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۱۲/۱۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۳/۱۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی
۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیطزیست، دانشگاه شهید بهشتی.
*- نویسنده مسئول

Optimal Placement and Pumping Rates of Groundwater Wells by Use of a Simulation-Optimization Approach

A. Ghasemi Nejad [1] and M. Shourian[2]*

Abstract

Improper wells location and excessive groundwater extraction can cause severe damage to aquifers and lead to numerous economic consequences. The purpose of this study is to develop a simulation-optimization model for determination of optimal wells' placement and pumping rates while satisfying the requirement of quantitative and qualitative considerations. The proposed model integrates the groundwater flow simulation model MODFLOW and the Particle Swarm Optimization algorithm. The coupled PSO-MODFLOW model has been applied to the Sarakhs aquifer in the north-east of Iran to minimize the total cost of drilling, transferring, and water treatment for supplying the drinking demand of the Sarakhs city. Discharges as well as locations of the pumping wells were taken as the decision variables. Also the maximum pumping rate and maximum water-table drawdown were incorporated as the problem constraints. The results show that the proposed approach not only satisfies the constraints but also reduces the total cost of water withdrawal by 5% from 5980 million Rials in the present plan to 5720 million Rials in the optimum plan. Sensitivity analyses indicates that results are not significantly sensitive to changes in aquifer hydraulic conductivity while the maximum pumping rate directly affects the number of required wells and can therefore make a considerable change in the final cost.

Keywords: Pumping wells, Optimum design of placement and pumping rate, Simulation-optimization, MODFLOW, PSO.

Received: March 8, 2016
Accepted: June 1, 2016

1- Graduate, Department of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
2- Assistant Professor, Department of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
Email:m_shourian@sbu.ac.ir
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

آب زیرزمینی یکی از منابع اصلی تأمین نیازهای آبی در نواحی خشک و نیمه‌خشک نظیر ایران است. وجود بیش از ۶۰۰ هزار حلقه چاه آب در آبخوان‌های آبرفتی و سازند سخت حاکی از اهمیت منابع آب زیرزمینی در کشور ما در مصارف مختلف (کشاورزی، شرب و بهداشت و صنعت) است. حجم قابل‌توجه برداشت از این منابع با استفاده از روش‌های حفاری مختلف و از طریق حفر چاه‌های نیمه عمیق و عمیق تأمین می‌شود. یکی از مسائل مهم در مدیریت منابع آب زیرزمینی تعیین محل مناسب برای حفر چاه‌های جدید، تعیین 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 تأمین کنند. علاوه بر تأمین نیازهای آبی، شرایط توسعه پایدار و شرایط زیست‌محیطی نیز بایستی مدنظر قرار گیرد (Elci and Ayvaz, 2014). برداشت‌های بی‌رویه از چاه‌ها می‌تواند موجب افت سطح آب زیرزمینی در درازمدت شود که اثرات نامطلوبی همچون ورود آب‌های بی‌کیفیت به چاه‌ها، کاهش سطح آب جریان‌های سطحی همچون رودخانه‌ها و همچنین نشست زمین را به دنبال خواهد داشت (Conkling, 1964). علاوه بر تأمین نیازهای آبی و زیست‌محیطی، با توجه به اینکه حفر چاه‌های بهره‌برداری، انتقال آب و تصفیه آن نیازمند مصرف انرژی و هزینه‌های زیاد می‌باشد، تعیین مکان‌های مناسب برای حفر چاه‌های بهره‌برداری و میزان بهینه دبی پمپاژ در آن‌ها می‌تواند باعث صرفه‌جویی چشمگیری در هزینه‌ها گردد.

پیشینه حفر چاه‌های آب با استفاده از فن‌آوری‌های جدید در کشور ما به حدود نیم‌قرن می‌رسد. طی این مدت نسبتاً طولانی شیوه‌نامه‌ها، راهنماها و دستورالعمل‌هایی به صورت پراکنده توسط متخصصین و کارشناسان صنعت آب در زمینه تعیین محل چاه‌ها و نحوه نظارت بر آن‌ها تهیه شده و مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از مطالعات و داده‌های هیدروکلیماتولوژی مانند میزان و نوع بارش و شدت آن، میزان تبخیر و حجم روان آب‌ها، استفاده از بررسی‌های زمین‌شناسی مانند نوع و اندازه ذرات تشکیل‌دهنده آبخوان و در حالت کلی میزان نفوذپذیری لایه‌های آبخوان و استفاده از بررسی‌های اکتشافی که به وسیله روش‌های ژئوفیزیکی انجام شده و منجر به شناخت تعداد، عمق و جنس لایه‌های آبخوان می‌شود، از جمله راهکارهایی هستند که برای تعیین محل چاه‌های بهره‌برداری استفاده می‌شود (Iran Ministry of Energy, 2013). استفاده همزمان از اطلاعات ذکرشده، اطلاعات کاربری اراضی و نقشه‌های کیفی آب زیرزمینی به منظور جانمایی بهینه چاه‌ها با هدف تأمین نیازهای آبی و رعایت مناسب مسائل اقتصادی، زیست‌محیطی و حقوقی، به علت تعداد زیاد قیدهای مسئله امری دشوار و زمان‌بر می‌باشد. علاوه بر آن پاسخ آبخوان به حفر چاه‌ها در نقاط طراحی‌شده، مشخص نبوده و میزان افت در چاه که از پارامترهای مهم جهت تعیین محل بهینه و میزان دبی پمپاژ چاه‌ها می‌باشد نامعلوم باقی می‌ماند. با توجه به هزینه‌های هنگفتی که سالانه در امر حفر این چاه‌ها بر دوش دولت و همچنین بخش خصوصی به ویژه کشاورزان سنگینی می‌کند، توسعه مجموعه‌ای جامع و یکپارچه که بتواند از تمامی اطلاعات موجود به صورت همزمان استفاده کرده و با استفاده از ابزارهای بهینه‌سازی، مناسب‌ترین نقاط را برای حفر چاه تعیین نماید ضروری به نظر می‌رسد.

استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی در حل مسائل مدیریت منابع آب زیرزمینی روشی متداول بوده و بسیار مورد توجه محققان می‌باشد. بهره‌گیری از یک مدل شبیه‌ساز و تلفیق آن با یک الگوریتم فراکاوشی به منظور حل مسئله بهینه‌سازی جانمایی و نرخ پمپاژ چاه‌ها، رویکردی است که بیش از دو دهه قدمت داشته و با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی متفاوت و به منظور نیل به اهداف گوناگون، بارها مورد استفاده قرارگرفته شده است. McKinney and Lin (1994) با استفاده از الگوریتم فراکاوشی ژنتیک به منظور کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری از آبخوان به بهینه‌سازی نرخ پمپاژ و مکان چاه‌ها از میان تعدادی مکان از پیش تعیین‌شده پرداختند. Huang and Mayer (1997) جهت بهینه‌سازی فرایند بازیابی آبخوان از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. آنها محل چاه‌ها و نرخ پمپاژ را به عنوان متغیرهای تصمیم در تابع هدف استفاده کرده و مقادیر بهینه آنها را محاسبه کردند. Storck et al. (1997) با تلفیق یک مدل شبیه‌سازی حرکت ذرات مبتنی بر روش مونت کارلو[1] و الگوریتم بهینه‌سازی تبرید شبیه‌سازی شده[2] یک روش بهینه‌سازی به منظور طراحی شبکه چاه‌های مشاهده‌ای در آبخوان با هدف تعیین مقادیر اولیه شاخص آلودگی در آبخوان ارائه کردند. Hsiao and Chang (2002) با ترکیب دو الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و برنامه‌ریزی پویای تفاضلی مقید[3] به حل مسئله جانمایی و تعیین نرخ پمپاژ و تعداد بهینه چاه‌های بهره‌برداری جهت تأمین کامل نیازهای آبی پرداختند. آنها هزینه احداث چاه را به صورت هزینه ثابت و هزینه پمپاژ را به صورت وابسته به زمان در مسئله اعمال کردند. نتایج نشان می‌داد که اعمال هزینه ثابت در تابع هدف تأثیر زیادی در تعیین تعداد بهینه چاه‌ها خواهد گذاشت. Park and Aral (2004) با مدل‌سازی حرکت آب شور در آبخوان ساحلی و ترکیب آن با الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک،

به حل مسئله جانمایی بهینه چاه‌ها و تعیین نرخ پمپاژ مناسب برای آن‌ها در آبخوان ساحلی با در نظر گرفتن قید عدم هجوم آب شور در غالب یک مسئله چندهدفه پرداختند. Mantoglou et al. (2004) مسئله جانمایی چاه در آبخوان‌های ساحلی را با دو الگوریتم غیرخطی و فراکاوشی حل کرده و نتایج را مقایسه کردند. نتایج نشان می‌داد اگر چه الگوریتم غیرخطی سرعت بیشتری نسبت به الگوریتم فراکاوشی دارد ولی دقت آن پایین تر می‌باشد. Katsifarakis and Petala (2006) نیز به حل مسئله جانمایی و تعیین نرخ پمپاژ بهینه چاه‌ها در آبخوان ساحلی پرداختند با این تفاوت که آن‌ها برای مدل‌سازی هجوم آب شور از روش المان مرزی[۴] استفاده کردند. آن‌ها مدل مذکور را با الگوریتم ژنتیک تلفیق کرده و جهت حل مسئله استفاده کردند. Gaur et al. (2011) با تلفیق دو مدل شبیه‌سازی Analytic Element Method (AEM) و مدل بهینه‌سازی ازدحام ذرات[۵] و توسعه مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی به حل مسئله مدیریت آب زیرزمینی در حوضه رودخانه Dore در فرانسه پرداختند. هدف آنها در این تحقیق حداکثر کردن میزان برداشت از آبخوان و حداقل کردن هزینه‌ها می‌باشد. هزینه‌های در نظر گرفته‌شده، شامل هزینه احداث چاه جدید و هزینه لوله‌گذاری و انتقال آب می‌باشد. متغیرهای تصمیم، نرخ و محل چاه‌های جدید در آبخوان بوده که در نهایت مقادیر بهینه برای آنها حاصل شد. Ch et al. (2013) با ترکیب مدل جایگزین شبیه‌سازی ماشین‌های بردار پشتیبان[۶] و مدل بهینه‌سازی ازدحام ذرات، یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی 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. Ayvaz and Elci (2013) با توسعه مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مبتنی بر مدل شبیه‌سازی MODFLOW و الگوریتم فراکاوشی جستجوی هارمونی[۷] سعی کردند هزینه حفر، تجهیز و پمپاژ از چاه‌های جدید در آبخوانی در شهر ازمیر ترکیه را به حداقل برسانند. هدف آن‌ها از حل مسئله، جانمایی بهینه چاه‌های بهره‌برداری جدید و تعیین نرخ پمپاژ مناسب برای آنها به منظور تأمین کلیه نیازهای آبی بود. Elci and Ayvaz (2014) مسئله قبل را با یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی بر مبنای الگوریتم تکامل تفاضلی[۸] مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این مسئله علاوه بر مسائل کمی مانند حداقل کردن هزینه‌ها، اهداف کیفی را هم وارد مسئله کردند.(2011) Ketabchi and Ataie-Ashtiani مدل تلفیقیِ شبیه‌سازی عددی و بهینه‌سازی به روش جامعه مورچه‌ها[۹] در محیط‌های پیوسته و با اعمال راهبُرد Elitist را برای مدیریت بهینه آبخوان‌های ساحلی دریا ارائه کردند. تابع هدف مدل بهینه‌سازی، حداکثر نمودن مقدار پمپاژ از سلول‌های موجود در آبخوان ساحلی می‌باشد، به طوری که از پیشروی آب شور دریا به آنها ممانعت به عمل آید. پمپاژ از آب زیرزمینی، به عنوان متغیر تصمیم‌گیری مدنظر بوده و از سلول‌های از پیش انتخاب‌شده، انجام پذیرفت. Nakhaei et al. (2014) به منظور مدیریت بهره‌برداری بهینه از آبخوان دشت ساحلی ارومیه و تعیین نرخ بهینه پمپاژ چاه‌های بهره برداری از یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی استفاده کردند. در این پژوهش ابتدا جریان آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعاتی شبیه‌سازی شد، سپس نرخ پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری با توجه به هدف مورد نظر (کمینه سازی نرخ پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری) و با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه گردید.

در تحقیق حاضر استفاده توأم از مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی در کنار الگوریتم بهینه‌سازی به عنوان راهکاری کارآمد در تعیین محل و دبی بهینه پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری مد نظر قرار گرفته که تاکنون در تحقیقات داخلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در تحقیقات بین‌المللی نیز حل مسئله فوق اغلب با تأکید بر اهداف کمی (تأمین نیازهای آبی، حداقل کردن هزینه) و اهداف کیفی به صورت مجزا صورت گرفته و بررسی همزمان آن‌ها کمتر صورت گرفته است. در این تحقیق اهداف کمی و کیفی به صورت توأمان در تابع هدف پیاده‌سازی شده و هدف مسئله علاوه بر به حداقل رساندن هزینه‌ها، استخراج آب با کیفیت هر چه مطلوب‌تر نیز می‌باشد. لذا پیاده‌سازی اهداف کمی و کیفی به صورت همزمان از جنبه‌های نوآوری تحقیق حاضر به شمار می‌آید.

۲- مواد و روش‌ها

رویکرد اصلی این تحقیق استفاده از مدل شبیه‌سازی MODFLOW و الگوریتم دسته ذرات (PSO) به صورت توأم و در قالب یک برنامه یکپارچه به منظور بهینه‌سازی مکان و نرخ پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری از آب زیرزمینی می‌باشد که در قالب مطالعه موردی طرح تأمین آب شرب شهر سرخس مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور با بررسی نقشه چاه‌های محدوده مطالعاتی، تعداد و موقعیت چاه‌های تأمین‌کننده آب شرب شهر سرخس و همچنین مجموع برداشت سالیانه از آن‌ها در سال طرح مشخص می‌شود. سپس چاه‌های مذکور از مدل شبیه‌سازی آبخوان حذف شده و مسئله بهینه‌سازی جانمایی و تعیین ظرفیت چاه‌های آب شرب شهر سرخس به تعداد یکسان با چاه‌های حذف‌شده و همچنین با هدف تأمین کامل نیاز آبی برابر با مجموع برداشت از چاه‌های مذکور با استفاده از مدل

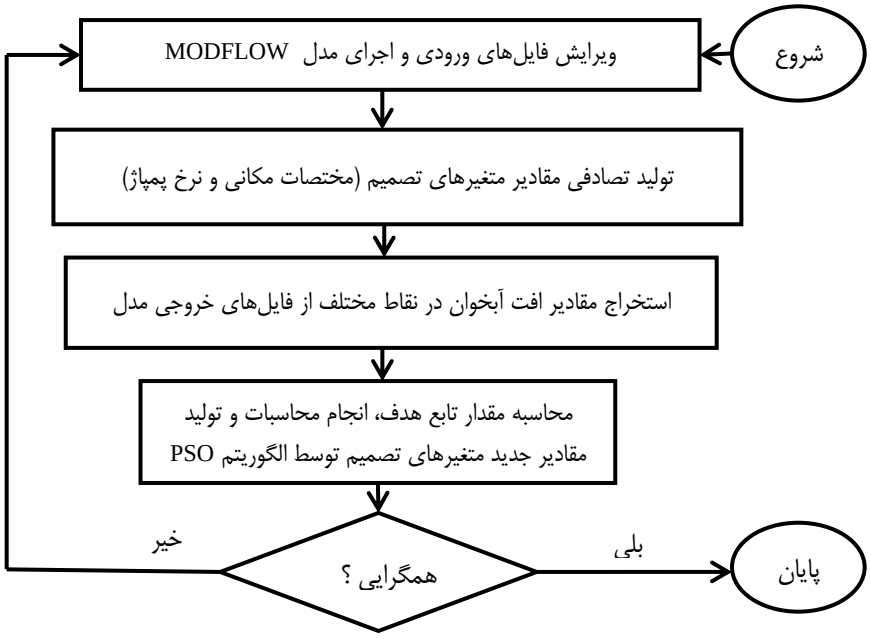
PSO-MODFLOW حل و بررسی می‌گردد. در این سناریو فرض می‌شود که طرح تنها برای تأمین یک سال نیاز آب شرب طراحی و اجرا می‌شود. در رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، مدل شبیه‌سازی جهت محاسبه تابع هدف ریاضی در الگوریتم بهینه‌سازی استفاده می‌شود، به عبارت دیگر جواب‌های اولیه تولیدشده توسط الگوریتم بهینه‌سازی باید به نحوی وارد مدل شبیه‌سازی شده، مدل شبیه‌سازی اجرا گشته و نتایج خروجی به الگوریتم بهینه‌سازی برگردانده شوند. بدین منظور قطعه کدی در زبان VB.NET توسعه داده شد که با ویرایش فایل‌های ورودی و خروجی در مدل MODFLOW رابطه بین مدل شبیه‌سازی و الگوریتم PSO را برقرار می‌کند. در شکل ۱ ساختار کلی ارتباط بین مدل شبیه‌سازی و الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.

۲-۱- مدل شبیه‌سازی حرکت آب زیرزمینی

آنچه در خصوص آب‌های زیرزمینی به نام مدل خوانده شده، شبیه‌سازی حرکت آب در محیط متخلخل می‌باشد (Todd and Mays, 2005) به عبارت دیگر یک مدل آب زیرزمینی فرم ساده‌شده‌ای از یک سیستم آب زیرزمینی است که همبستگی بین کنش و واکنش هیدرودینامیکی را نشان می‌دهد. مدل‌های آب زیرزمینی دارای انواع مختلفی از جمله مدل‌های فیزیکی، آنالوگ و ریاضی می‌باشند. در دهه‌های اخیر با پیشرفت رایانه، مدل‌های ریاضی زیادی به وجود آمده است که امروزه کاربرد وسیعی در مطالعه آب‌های زیرزمینی دارند. این مدل‌ها به همراه راه‌حل‌های عددی، یکی از روش‌های مناسب در مطالعات هیدروژئولوژی محسوب می‌شوند. در تحقیق حاضر، به منظور شبیه‌سازی عکس‌العمل آبخوان نسبت به حفر چاه‌های بهره‌برداری از مدل MODFLOW استفاده گردیده است. این مدل با توجه به قابلیت بالا و داشتن زیر برنامه‌های مختلف که دربرگیرنده پارامترهای گوناگون تشکیل‌دهنده یک سیستم آب زیرزمینی می‌باشد و همچنین به خاطر کارایی بالا در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی، واسنجی خودکار با استفاده از کدهای Pest و Ucode و سهولت کاربرد مدل، تقریباً مدلی کامل از نظر مدل‌سازی عددی یک سیستم در محیط اشباع و تشکیلات آبرفتی می‌باشد .در این تحقیق از نرم‌افزار GMS جهت شبیه‌سازی آبخوان دشت سرخس بر مبنای کد MODFLOW استفاده شده است. در این کد معادله حاکم بر جریان در محیط متخلخل اشباع در فرم سه‌بعدی به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K_z \frac{\partial h}{\partial z}\right] - w = s_s \frac{\partial h}{\partial t} \qquad (۱)$$

که در آن K_X، K_Y و K_Z مقادیر هدایت هیدرولیکی در جهات سه‌گانه مختصات کارتزین بر حسب واحد طول بر زمان، h سطح آب بر حسب واحد طول، w میزان تخلیه بر حسب شدت تخلیه در واحد سطح، S_s ضریب ذخیره بر حسب درصد و t واحد زمان می‌باشد. معادله (۱) جریان آب زیرزمینی را در شرایط غیرمتعادل در یک محیط ناهمگن و ناهمسان نشان می‌دهد. مدل MODFLOW برای حل این معادله از روش تفاضل محدود استفاده می‌کند.



شکل ۱- ساختار کلی ارتباط بین مدل شبیه‌سازی و الگوریتم بهینه‌سازی

۲-۲- الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات (Particle Swarm Optimization)

ایده الگوریتم دسته ذرات اولین بار توسط Kennedy and Eberhart (1995) مطرح شد. این روش از پرواز گروهی پرندگان و شنای گروهی ماهی‌ها به منظور دستیابی به غذا و زندگی اجتماعی آنان الهام گرفته‌شده و با استفاده از روابط ساده‌ای فرمول‌بندی شده است. الگوریتم دسته ذرات دارای دو بردار اصلی سرعت و موقعیت می‌باشد. بردار سرعت برای نشان دادن حرکت ذرات و بردار موقعیت برای نشان دادن موقعیت ذره، پیش و پس از حرکت در نظر گرفته شده است. الگوریتم دسته ذرات نیز مانند سایر الگوریتم‌های تکاملی دیگر، با ایجاد یک جمعیت تصادفی از ذرات شروع می‌شود که دسته ذرات نامیده می‌شود. هر ذره در گروه مبین یک جواب از فضای تصمیم و مجموعه‌ای از متغیرهای تصمیم مسئله است که در روند بهینه‌سازی توسط الگوریتم تکاملی مقدار بهینه این متغیرهای تصمیم و به تبع آن جواب بهینه مسئله یافت می‌شود. در الگوریتم دسته ذرات هر عضو از جمعیت، با استفاده از بردار سرعت خود در فضای جستجو حرکت می‌کند و در طول این حرکت بهترین موقعیتی که هر ذره در فضای جستجو به طور فردی به آن می‌رسد ($Pbest_i$) و بهترین موقعیتی که یکی از ذرات در مقایسه با تمامی ذرات دسته قرار گرفته است ($Gbest_i$) ذخیره می‌شود و در نهایت هر ذره با استفاده از روابط زیر فضای جستجو را در جهت یافتن جواب بهتر جستجو می‌کند.

$$V_i^{t+1} = wV_i^t + c_1 r_1 (Pbest_i - X_i^t) + c_2 r_2 (Gbest_i - X_i^t) \quad (۲)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (۳)$$

که در آن X_i^t و V_i^t به ترتیب موقعیت و سرعت ذره i در تکرار قبل هستند. r_1 و r_2 اعداد تصادفی با توزیع نرمال در بازه [۰،۱] بوده و c_1 و c_2 که ضرایب تشدیدکننده نامیده می‌شوند، تأثیر بهترین موقعیت قبلی هر ذره و بهترین موقعیت کل ذره در تکرار قبل را، بر میزان سرعت در تکرار جدید کنترل می‌کنند. w ضریب اینرسی وزنی است که تأثیر سرعت در تکرار قبل را در سرعت جدید تنظیم می‌کند.

رابطه (۲) برای محاسبه سرعت جدید (V_i^{t+1}) ذره i و رابطه (۳) جهت به‌روزرسانی موقعیت ذره i (X_i^{t+1}) به کار می‌رود.

یکی از مشکلات متعارف در استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی، گرفتار شدن الگوریتم در نقاط بهینه محلی و در نتیجه همگرایی زودرس می‌باشد. از دلایل اصلی همگرایی زودرس در الگوریتم PSO، توقف فرآیند اکتشاف در قسمت‌های جدید از فضای جستجو توسط ذرات پس از همگرا شدن به یک جواب بهینه محلی و یا حتی یک جواب نزدیک به آن می‌باشد. یکی از این روش‌ها جلوگیری از به وجود آمدن این شرایط و وادار نمودن ذرات PSO به اکتشاف در مناطق مختلف از فضای جستجو با استفاده از روش کشش تابع[۱۰] می‌باشد. در این روش در صورت توقف روند جستجو در یک نقطه بهینه محلی، با استفاده از دو تابع انتقال در دو مرحله، تابع هدف مسئله بهینه‌سازی در جهت حذف بهینه‌های محلی ناخواسته تغییر شکل می‌یابد. این انتقال دو مرحله‌ای را می‌توان با استفاده از روابط زیر بیان نمود:

$$G(x) = f(x) + \frac{\gamma_1}{2}\|x - \bar{x}\|(sign(f(x) - f(\bar{x})) + 1) \quad (۴)$$

$$\mathrm{H(x)} = G(x) + \frac{\gamma_2(sign(f(x) - f(\bar{x})) + 1)}{2\tanh(\mu(G(x) - G(\bar{x})))} \quad (۵)$$

در این روابط $f(x)$ تابع هدف اولیه مسئله، $\bar{x}$ نقطه بهینه محلی ردیابی شده در تابع $f(x)$، γ_1 و γ_2 و μ ثابت‌های اختیاری مثبت انتخاب شده و $sign(\ )$ نشان‌دهنده تابع علامت سه مقداره شناخته‌شده می‌باشد. به منظور اطمینان از کارایی کد الگوریتم نوشته‌شده، مسئله Ackley در حالت ۱۰ بعدی به وسیله الگوریتم ساده PSO و الگوریتم PSO همراه با روش کشش تابع (SPSO) حل شده و نتایج با نتایج حاصله از الگوریتم کرم شب‌تاب[۱۱] (Davoodi, 2014) مقایسه می‌شود. در جدول ۱ نتایج حاصل از ۱۰ بار حل مسئله کمینه‌سازی تابع Ackley در حالت ۱۰ بعدی با استفاده از الگوریتم‌های PSO، SPSO و الگوریتم کرم شب‌تاب آورده شده است.

جدول ۱- نتایج حل مسئله کمینه‌سازی تابع Ackley ده بعدی

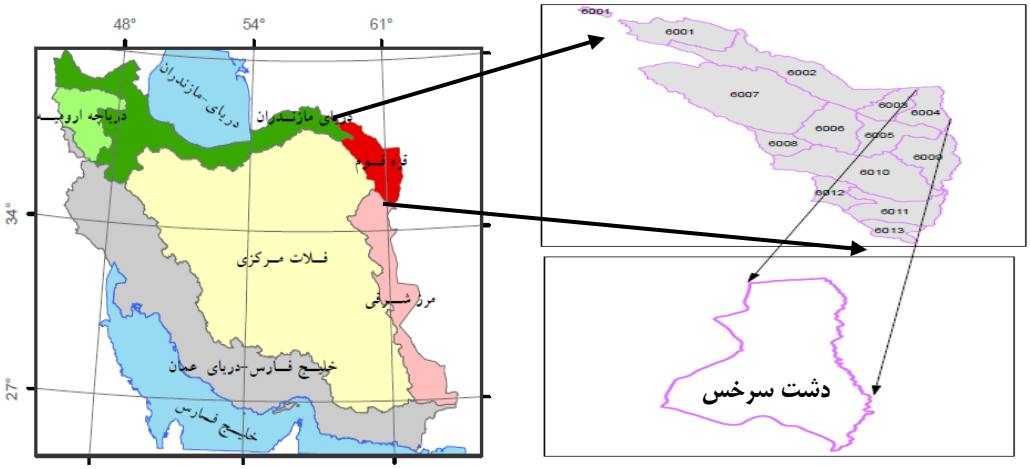
الگوریتم	بهترین جواب	میانگین	انحراف معیار
PSO	۲/۷۵۱۵	۲/۸۸۹۴	۰/۰۷۹۲
SPSO	$۱/۶۵۴۴\times۱۰^{-۱۵}$	$۳/۴۹۳۷\times۱۰^{-۱۵}$	$۱/۲۵۲۹\times۱۰^{-۱۵}$
Firefly	$۱/۵۰۹۹\times۱۰^{-۱۴}$	$۲/۶۳۰۷\times۱۰^{-۱۳}$	$۳/۶۱۲۱\times۱۰^{-۱۳}$

مقایسه همه نتایج، نشان از برتری الگوریتم SPSO در رسیدن به جواب نسبت به دو الگوریتم دیگر دارد. در این تحقیق از الگوریتم PSO همراه با روش کشش تابع برای انجام عملیات بهینه‌سازی استفاده می‌شود.

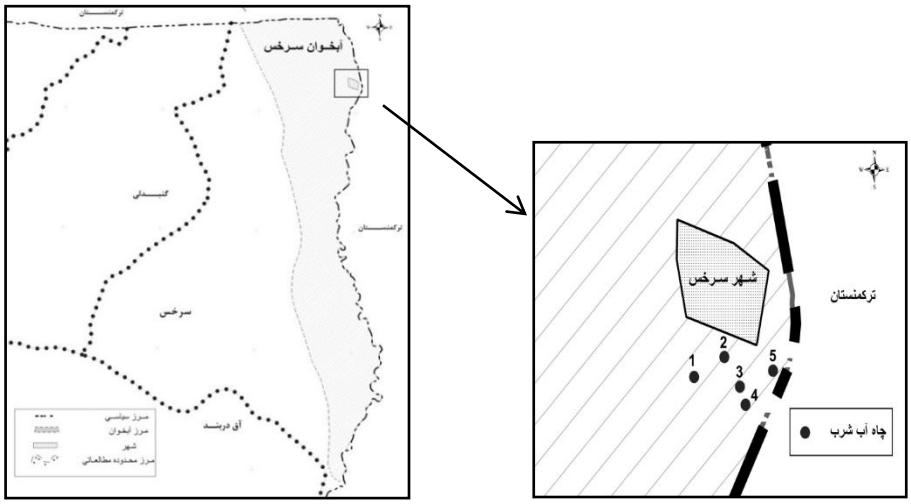
۲-۳- منطقه مورد مطالعه

دشت سرخس واقع در شمال شرق حوضه آبریز قره‌قوم در امتداد مرز ایران و ترکمنستان بین طول‌های جغرافیایی "۰۰ '۰۵ °۶۱ و "۰۰ '۱۵ °۶۱ شرقی و عرض‌های جغرافیایی "۰۰ '۰۰ °۳۶ و "۰۰ '۴۰ °۳۶ شمالی قرار گرفته است (شکل ۲). این دشت از سمت شرق به رودخانه هریرود و از سمت غرب به ارتفاعات منتهی می‌شود. آبخوان دشت سرخس از نوع آزاد، دارای یک لایه آبرفتی و مساحت آن ۷۰۹/۵ کیلومترمربع می‌باشد.

حوضه مطالعاتی سرخس در استان خراسان رضوی و جزو محدوده شهرستان سرخس بوده و دارای ۳۴۶۷۵ نفر جمعیت شهری و ۳۱۴۹۰ نفر جمعیت روستایی می‌باشد. شهر سرخس تنها شهر این منطقه بوده و قسمت اعظم آب شرب مورد نیاز آن به وسیله چندین حلقه چاه بهره‌برداری از آب زیرزمینی تأمین می‌شود. بررسی نقشه موقعیت چاه‌های شرب محدوده مطالعاتی نشان می‌دهد که در اطراف شهر سرخس تعداد پنج حلقه چاه با مجموع برداشت ۱/۵۹ میلیون مترمکعب در سال به صورت متمرکز در ناحیه جنوبی آن واقع شده و به غیر از آن‌ها، در دیگر نواحی تا شعاع حدود سه کیلومتر چاه دیگری برای تأمین آب شرب وجود ندارد. با توجه به این موضوع، چاه‌های مذکور به عنوان چاه‌های تأمین‌کننده آب شهر سرخس فرض شده و به منظور انجام عملیات بهینه‌سازی انتخاب شدند. در شکل ۳ موقعیت چاه‌های آب شرب شهر سرخس نشان داده شده است.



شکل ۲- مکان جغرافیایی حوضه قره‌قوم و دشت سرخس



شکل ۳- موقعیت چاه‌های شرب شهر سرخس

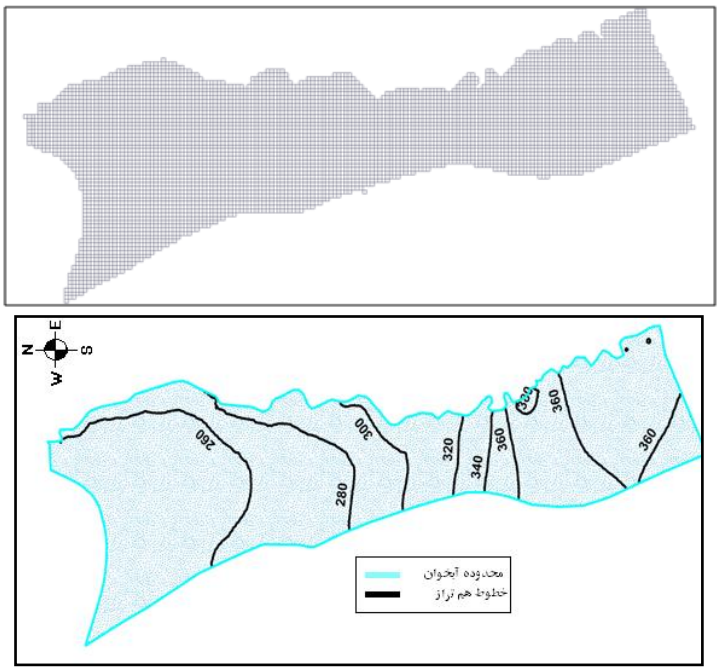
آمار و اطلاعات هواشناسی، هیدرولوژیکی و زمین‌شناسی شامل میزان بارش، تبخیر، حجم رواناب‌ها، نفوذپذیری لایه‌های آبخوان، نوع و تعداد لایه‌ها، موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای و همچنین اطلاعات مربوط به بهره‌برداری از منابع آب از مطالعات طرح جامع آب کشور (Toossab Consulting Engineers Company, 2013) استخراج گردیده است که مربوط به سال آبی ۸۶-۸۵ (سال پایانی انجام مطالعات) می‌باشد.

۲-۳-۱- شبیه‌سازی آبخوان دشت سرخس

به منظور مدل‌سازی آبخوان دشت سرخس با استفاده از مدل MODFLOW، از یک شبکه ۸۴×۱۹۶ به ابعاد ۳۰۰×۳۰۰ متر در نرم‌افزار GMS استفاده شده است. مرزهای آبخوان به غیر از جبهه‌های ورودی و خروجی به صورت ناتراوا و جبهه‌های ورودی و خروجی به وسیله مرز جریان مشخص[۱۲] مدل‌سازی شد. پس از اجرای اولیه مدل، با توجه به عدم تطابق مناسب نتایج به دست آمده با مقادیر واقعی، پارامترهای هدایت هیدرولیکی افقی، ناهمسانگردی افقی و پارامتر تغذیه در مدل شبیه‌سازی با استفاده از کد PEST واسنجی شدند. در نهایت پس از اعمال مقادیر واسنجی شده، مدل در حالت پایدار اجرا شده و مقادیر سطح آب زیرزمینی در نقاط مختلف آبخوان به دست آمد. شبکه‌بندی انجام‌شده در نرم‌افزار GMS و نقشه خطوط هم‌تراز سطح آب زیرزمینی آبخوان پس از کالیبراسیون نهایی در شکل ۴ نشان داده شده است.

۲-۴- مدل بهینه‌سازی مکان و نرخ پمپاژ چاه‌ها (تابع هدف)

تابع هدف مسئله به صورت یک تابع کمینه‌سازی هزینه بیان می‌گردد. هزینه‌های در نظر گرفته‌شده در این تابع شامل هزینه‌های حفاری چاه (حفر و تجهیز چاه، هزینه انرژی)، هزینه‌های مربوط به انتقال آب تا مقصد (تجهیز و لوله‌گذاری) و هزینه‌های مربوط به تصفیه آب استخراج‌شده می‌باشد. متغیرهای تصمیم در این مسئله مختصات و نرخ پمپاژ چاه‌ها بوده که بایستی به نحوی مشخص شوند که ترکیب آن‌ها باعث ایجاد بهترین حالت (کمترین هزینه) گردد. 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 تأثیرگذار خواهد بود و از طرفی با فاصله گرفتن از محل مصرف هزینه‌های انتقال افزایش خواهد یافت. تغییر دبی پمپاژ چاه‌ها نیز با هزینه تصفیه رابطه مستقیم داشته و همچنین با تأثیر بر روی انرژی مصرفی پمپ در فرایند استخراج آب، در هزینه‌های استخراج نیز مؤثر خواهد بود. قیود موجود در مسئله به دو دسته تقسیم می‌شوند.



شکل ۴- شبکه مش‌بندی مدل (فوقانی) و خطوط هم‌تراز سطح آب زیرزمینی آبخوان سرخس (تحتانی)

دسته اول قیود مربوط به محدودیت‌های متغیرهای تصمیم مسئله (مختصات و نرخ پمپاژ) می‌باشند که در درون مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مطابق با مشخصات محدوده واقعی اعمال می‌شوند. دسته دیگر شامل محدودیت افت سطح آب زیرزمینی و تأمین نیاز آبی می‌باشد که به منظور اعمال آن‌ها از روش تابع جریمه استفاده می‌شود. روش تابع جریمه از روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی مقید می‌باشد که در آن یک مسئله بهینه‌سازی محدود با مجموعه‌ای از مسائل بدون قید جایگزین می‌شود. مسائل بدون قید با افزودن یک شرط به تابع هدفی به وجود می‌آیند که متشکل از یک ضریب جریمه و میزانی از نقض قید و محدودیت‌ها هستند. زمانی که محدودیت‌ها نقض شوند، میزان نقض مخالف صفر و زمانی که قیدها نقض نشوند، برابر با صفر می‌باشد.

در این تحقیق به منظور برآورد هزینه‌های مربوط به حفاری، چاهی به قطر ۱۶ اینچ و قطر لوله ۱۰ اینچ انتخاب شده و استخراج تابع هزینه حفاری بر اساس آن صورت گرفت. همچنین با در نظر گرفتن حداکثر نرخ پمپاژ و با فرض کارکرد پمپ به مدت ۲۰۰ روز در سال، پمپ مناسب انتخاب شده و هزینه خرید آن نیز در تابع هزینه اعمال شد. تابع نهایی هزینه استخراج در طول یک سال به شکل رابطه (۶) می‌باشد. در این رابطه dep عمق حفاری می‌باشد.

(۶)

$$f_1(dep) = \begin{cases} dep \times 3041718.75 + 262114400 & ,dep \le 50 \\ (dep-50) \times 3107896.25 + 414200337 & ,dep \le 100 \\ (dep-100) \times 3426423.75 + 569595150 & ,dep \le 150 \\ (dep-150) \times 3540882.5 + 740916337 & ,dep \le 200 \end{cases}$$

به منظور تعیین هزینه انرژی مصرفی (برق) ابتدا توان مورد نیاز پمپ با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می‌شود. سپس با ضرب توان پمپ در مدت فعالیت آن (بر حسب ساعت) و در تعرفه انرژی (ریال بر کیلووات ساعت)، هزینه نهایی محاسبه می‌شود. شکل نهایی تابع هزینه کارکرد پمپ به شکل رابطه (۸) می‌باشد.

$$P = \frac{(9.806).hp.Q}{e} \quad (۷)$$

$$f_2(hp, Q) = 0.677 \times Q \times hp \quad (۸)$$

در رابطه فوق، P توان مصرفی بر حسب کیلووات، hp ارتفاع مکش بر حسب متر، Q دبی پمپاژ بر حسب مترمکعب بر ثانیه و e راندمان پمپ می‌باشد. جهت برآورد هزینه‌های مربوط به انتقال با توجه به نرخ بیشینه پمپاژ، لوله‌ای با قطر ۱۴۰ میلی‌متر و از جنس پلی‌اتیلن به عنوان مبنای محاسبات قرار گرفته و عملیات متره و برآورد انجام شد.

تابع هزینه انتقال آب در طول یک سال در رابطه (۹) نشان داده شده است.

$$f_3(distance) = 354526 \times distance + 23082120 \quad (۹)$$

$$distance = \sqrt{(x_{target} - x_i)^2 + (y_{target} - y_i)^2} \quad (۱۰)$$

در روابط ذکرشده distance فاصله مستقیم محل حفر چاه تا نقطه مقصد می‌باشد که از طریق رابطه (۱۰) محاسبه می‌گردد. در این رابطه x_i, y_i مختصات چاه i ام در شبکه مدل MODFLOW و x_{target}, y_{target} مختصات نقطه مقصد در شبکه مدل MODFLOW می‌باشند.

در این مقاله مقدار مواد جامد محلول در آب[۱۳] (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. همچنین از میان روش‌های نمک‌زدایی، روش اسمز معکوس مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه کیفیت و حجم آب ورودی به واحد تصفیه متناسب با تغییر مختصات چاه تغییر می‌کند، برای برآورد هزینه نمک‌زدایی نیاز به تابع هزینه‌ای می‌باشد که نسبت به کیفیت و حجم آب ورودی متغیر باشد. در عملیات نمک‌زدایی، هزینه انرژی و هزینه مواد شیمیایی استفاده‌شده متناسب با مقدار TDS آب ورودی متغیر خواهند بود. در این میان با توجه به تأثیر ناچیز مواد شیمیایی در هزینه‌های کلی، این مقدار را ثابت فرض کرده و فقط هزینه انرژی، به عنوان تابعی از مقدار TDS در نظر گرفته می‌شود. رابطه میزان انرژی مصرفی و مقدار TDS به این‌گونه است که با افزایش مقدار TDS فشار اسمزی و در نتیجه فشار لازم برای انجام اسمز معکوس افزایش پیدا کرده و متناسب با افزایش فشار، مقدار انرژی مصرفی نیز بالا می‌رود. پس از محاسبه فشار اسمزی و هزینه انرژی مورد نیاز با استفاده از روابط مربوطه (Ghasemi-Nejad, 2005)، با توجه به اینکه هزینه انرژی حدود ۴۴٪ هزینه‌های کل را شامل می‌شود (Chaudhry, 2003)، رابطه زیر به منظور محاسبه هزینه نمک‌زدایی مورد استفاده قرار گرفت.

$$f_4 = Q \times (0.0173 \times TDS + 216.51) \quad (۱۱)$$

در این رابطه، TDS غلظت مواد جامد محلول در آب بر حسب میلی‌گرم در لیتر و Q دبی جریان ورودی بر حسب مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. مدل ریاضی تابع هدف بعد از اضافه شدن توابع جریمه به شکل رابطه زیر می‌باشد.

$$Minimize\ Z = \sum_{i=1}^{n}\{f_1(dep_i) + f_2(hp_i, Q_i)\} + \sum_{i=1}^{n} f_3(distance_i) + \sum_{i=1}^{n} f_4(quality_i, Q_i) + P_1 + P_2 + P_3 \quad (۱۲)$$

در رابطه فوق f_1 تابع هزینه حفاری، f_2 تابع هزینه مصرف انرژی، f_3 تابع هزینه انتقال آب و f_4 تابع هزینه تصفیه آب بوده که طبق روابط (۶) تا (۱۱) برای هر چاه محاسبه می‌شوند. همچنین n تعداد چاه، i شمارنده چاه و توابع p_1 ، p_2 و p_3 به ترتیب توابع جریمه مربوط به قیود محدودیت افت، تأمین نیاز آبی و حریم آبخوان می‌باشند که در قالب روابط زیر تعریف می‌گردند:

$$P_1 = \begin{cases} \alpha_1 \times (s_i - s_{max}); & s_i > s_{max} \\ 0; & s_i \le s_{max} \end{cases} \quad (۱۳)$$

$$s_{max} = \mathrm{H_0} - \frac{1}{3}\mathrm{T} \quad (۱۴)$$

$$P_2 = |(\sum_{i=1}^{n} Q_i) - Q_{demand}| \quad (۱۵)$$

$$P_3 = \alpha_3 B \quad (۱۶)$$

در روابط فوق s_i میزان افت تجمعی کل سطح آب زیرزمینی در محل چاه i ام بر حسب متر، s_{max} میزان حداکثر افت کل 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_2 و 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 در نظر گرفته شده برای مسئله شامل موارد زیر می‌باشد:

$$x_{min} \le x_i \le x_{max} \quad (۱۷)$$

$$y_{min} \le y_i \le y_{max} \quad (۱۸)$$

$$Q_{min} \le Q_i \le Q_{max} \quad (۱۹)$$

$$s_i \le s_{max} \quad (۲۰)$$

$$\sum_{i=1}^{n} Q_i = Q_{demand} \quad (۲۱)$$

که در آن، (x_i , y_i) مختصات چاه i ام در شبکه مدل MODFLOW، $[x_{min} \ x_{max}]$محدوده طولی فضای جستجو، $[y_{min} \ y_{max}]$ محدوده عرضی فضای جستجو، s_i میزان افت تجمعی کل سطح آب زیرزمینی در محل چاه i ام بر حسب متر، s_{max} میزان حداکثر افت کل مجاز سطح آب زیرزمینی بر حسب متر، Q_{min} و Q_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر نرخ پمپاژ مجاز بر حسب مترمکعب در سال است. همانگونه که مشخص است و با توجه به خصوصیات الگوریتمهای بهینه‌سازی فراکاوشی، قیود (۲۰) و (۲۱) بصورت تابع جریمه در تابع هدف مدل لحاظ شده‌اند. قیود (۱۹)–(۱۷) نیز در زمان تولید مقادیر متغیرهای تصمیم توسط الگوریتم PSO رعایت می‌گردند.

۳- نتایج و بحث

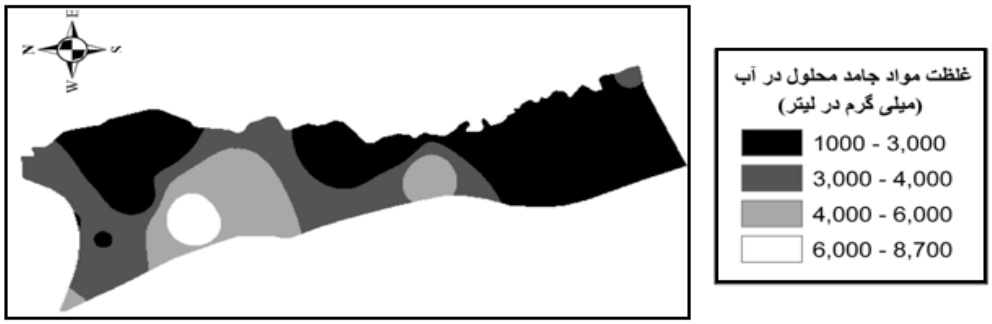
مرحله اول در حل مسئله، پیاده‌سازی تابع هدف در مدل PSO-MODFLOW و تعیین مقادیر حداقل و حداکثر مربوط به قیدهای مسئله بر اساس شرایط آبخوان می‌باشد. بر اساس شبکه ۸۴×۱۹۶ ساخته‌شده در مدل شبیه‌سازی آبخوان، فضای جستجوی طولی بازه سلولی ۸۴–۱ و فضای جستجوی عرضی بازه ۱۹۶–۱ تعیین گردید، همچنین نقطه هدف انتقال آب در مرکز شهر سرخس و در مختصات سلولی (۶۳، ۴۳) قرار داده شد. نرخ بیشینه برداشت از هر چاه برابر با نرخ پمپاژ بیشینه چاه‌های موجود (۴۶۰۰۰۰ مترمکعب در سال) و مقدار نیاز آبی برابر با مجموع تخلیه سالیانه آن‌ها (۱۵۹۰۰۰۰ مترمکعب در سال) در نظر گرفته شد. پارامترهای مربوط به الگوریتم PSO مطابق جدول ۲ و مقادیر ضرایب توابع جریمه (α_1، α_2، α_3) نیز با انجام آزمون و خطا برابر با 10^8 تعیین گردیدند.

با توجه به رابطه (۱۱) به منظور محاسبه تابع هزینه مربوط به تصفیه آب، نیاز به تعیین مقدار TDS آب زیرزمینی در مکان‌های مورد نظر برای حفر چاه می‌باشد. بدین منظور مقادیر TDS در سال طرح از اطلاعات ۴۰ حلقه چاه مشاهداتی موجود در آبخوان استخراج شده، سپس در محیط Arcgis با استفاده از روش درونیابی IDW به کل آبخوان بسط داده شد و در نهایت لایه اطلاعاتی مقادیر TDS در کل محدوده آبخوان حاصل گشت (شکل ۵). از طرف دیگر در شبکه‌بندی انجام شده در مدل MODFLOW، نقطه مرکزی هر سلول به عنوان نماینده شاخص کیفی کل سلول فرض شده و غلظت TDS در آن نقطه از مختصات متناظر در لایه اطلاعاتی ساخته شده در مرحله قبل استخراج شده و به عنوان مقدار شاخص کیفی در مسئله مورد استفاده قرار می‌گیرد.

پس از انجام تمامی مراحل آماده‌سازی، مدل PSO-MODFLOW اجرا گردید که نتایج حاصل از ۱۰ بار اجرای مدل در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین نمودار همگرایی بهترین مقدار تابع هزینه در شکل ۶ نشان داده شده است.

جدول ۲- پارامترهای مربوط به الگوریتم PSO

ضریب شناخت ($C1$)	ضریب اجتماعی ($C2$)	ضریب وزن اینرسی (w)	عامل انقباض (X)	تعداد ذرات	حداکثر تعداد تکرار
۲/۲۵	۱/۷۵	۰/۴–۱/۲	۰/۹	۲۵	۳۰۰



شکل ۵- نقشه پهنه‌بندی غلظت TDS در محدوده آبخوان

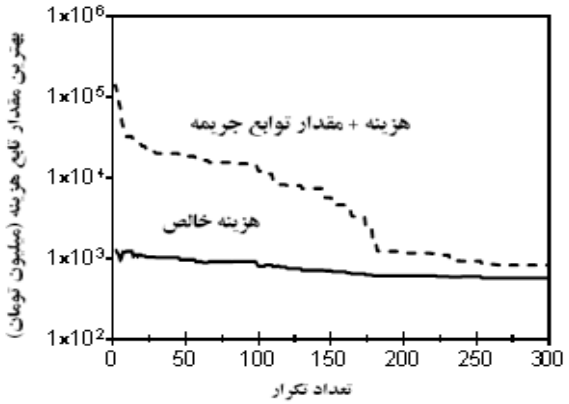
جدول ۳- نتایج حاصل از ده بار اجرای مدل

نتایج	هزینه خالص*
بهترین	۵۷۲/۷۸
بدترین	۶۵۶/۹۵
میانگین	۶۰۵/۶۸
انحراف معیار	۳۶/۷۳

* مقادیر بر حسب میلیون تومان می‌باشد.

در نمودار فوق فاصله بین دو نمودار نشان‌دهنده 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. مختصات و دبی به دست آمده برای هر یک از چاه‌ها در جدول شماره ۴ نشان داده شده است. همچنین موقعیت هر یک از این چاه‌ها به همراه موقعیت چاه‌های موجود در شکل ۷ نشان داده شده است.

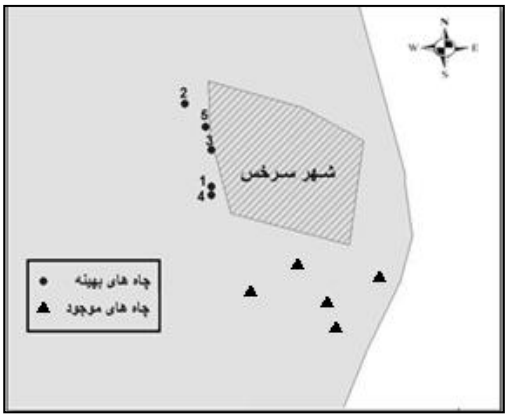
همان‌گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، مجموع نرخ پمپاژ چاه‌ها با مقدار نیاز آبی تعیین‌شده برای مسئله (۱/۵۹ میلیون مترمکعب در سال) برابر بوده که این امر نشان‌دهنده تأمین نیازهای آبی به صورت کامل می‌باشد. مقادیر افت سطح آب زیرزمینی در همه چاه‌ها کمتر یک متر به دست آمد که از مقدار مجاز کمتر می‌باشد، در نتیجه قیدهای مسئله همگی ارضا شده‌اند. بررسی مکان چاه‌ها و نقشه هم ضخامت آبرفت نشان می‌دهد اگرچه ضخامت لایه آبرفتی و در نتیجه هزینه حفاری در محل چاه‌های پیشنهادی نسبت به چاه‌های موجود بیشتر است اما به علت یکنواختی نسبی و تغییرات کم ضخامت لایه آبرفتی و همچنین عدم تغییرات زیاد شاخص آلودگی نسبت به تغییر مکان چاه‌ها، هزینه مربوط به انتقال آب بر دیگر هزینه‌ها غالب شده و چاه‌ها در ناحیه غربی و نزدیک به شهر قرار گرفته‌اند. به منظور بررسی کارآمدی طرح در حال بهره‌برداری، هزینه‌های طرح موجود با هزینه‌های طرح بهینه مقایسه شده که نتایج آن در جدول ۵ نشان داده شده است.



شکل ۶- نمودار همگرایی بهترین مقدار تابع هزینه

جدول ۴- مختصات و دبی بهینه چاه‌ها

شماره چاه	X (UTM)	Y (UTM)	نرخ پمپاژ (m^3/year)
۱	۸۷۱۷۷۸	۴۰۵۱۸۱۰	۲۹۵۰۰۰
۲	۸۷۱۴۷۹	۴۰۵۲۷۱۰	۳۱۰۰۰۰
۳	۸۷۱۷۷۸	۴۰۵۲۲۱۰	۴۵۶۰۰۰
۴	۸۷۱۷۷۸	۴۰۵۱۲۱۰	۲۱۲۰۰۰
۵	۸۷۱۷۷۸	۴۰۵۲۴۱۰	۳۱۷۰۰۰
مجموع برداشت			۱۵۹۰۰۰۰



شکل ۷- موقعیت چاه‌های بهینه و چاه‌های موجود

هزینه‌های طرح بهینه به دست آمده توسط مدل PSO-MODFLOW نسبت به طرح اصلی حدود ۵ درصد کاهش داشته است که این اختلاف کم نشان‌دهنده طراحی مناسب طرح موجود می‌باشد. همچنین بررسی اجزای هزینه‌ها نشان می‌دهد که سهم هزینه حفاری و استخراج آب نسبت به دیگر هزینه‌ها بیشتر بوده است. قابل‌ذکر 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 برهم‌افزا می‌باشد، در درازمدت می‌تواند تأثیرگذار باشد.

۳-۲- تحلیل حساسیت

در مبحث تحلیل حساسیت، هدف سنجش میزان حساسیت عملکرد مدل‌ها و نتایج به دست آمده با استفاده از آنها نسبت به مقادیر فرض شده و یا محاسبه شده برای پارامترهای مهم و اثرگذار می‌باشد. در تحقیق حاضر، تحلیل حساسیت می‌تواند نسبت به دو دسته پارامترهای مدل شبیه‌سازی (هدایت هیدرولیکی افقی و میزان تغذیه آبخوان) و بهینه‌سازی (ضرایب توابع هزینه، نرخ بیشینه برداشت، مقدار افت مجاز) صورت گیرد. با توجه به شرایط مسئله حاضر و میزان اهمیت پارامترها، نتایج تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای هدایت هیدرولیکی و نرخ بیشینه برداشت ارائه شده است. به منظور تحلیل حساسیت پارامتر هدایت هیدرولیکی یک‌بار مقدار آن ۵۰ درصد افزایش یافته و مدل اجرا شده و بار دیگر مقدار آن نسبت به شرایط اصلی ۵۰ درصد کاهش یافته و دوباره مسئله حل گردیده است. مقادیر جواب‌ها و نمودار همگرایی هزینه طرح در بهترین مقدار تابع هدف در هر دو حالت به ترتیب در جدول ۶ و شکل ۸ نشان داده شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، افزایش و کاهش مقدار هدایت هیدرولیکی آبخوان تأثیر چندانی در جواب نهایی ندارد و مدل نسبت به پارامتر هدایت هیدرولیکی افقی آبخوان حساس نمی‌باشد. تغییر هدایت هیدرولیکی از میان قیدهای مسئله بر روی میزان افت تأثیر می‌گذارد که با توجه به اینکه در این مسئله مقادیر افت کم بوده و نقش تعیین‌کننده‌ای در جواب مسئله ندارد، تغییر مقدار هدایت هیدرولیکی نیز در نتیجه پایانی چندان اثرگذار نیست.

جدول ۵- هزینه‌های طرح بهینه و طرح موجود *

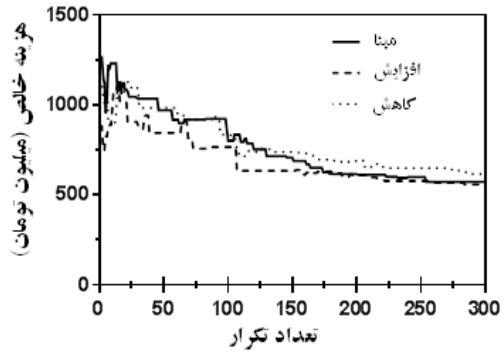
مشخصات	هزینه حفاری	هزینه انتقال آب	هزینه نمک‌زدایی	مجموع هزینه‌ها
طرح بهینه	۳۲۴/۹	۲۰۹/۸	۳۸/۲	۵۷۲/۷
طرح در حال بهره‌برداری	۲۸۱/۵	۲۷۷/۸	۳۸/۵۸	۵۹۸

* مقادیر بر حسب میلیون تومان می‌باشد.

جدول ۶- تحلیل حساسیت پارامتر هدایت هیدرولیکی

مشخصات طرح آب‌رسانی	هزینه خالص*	نسبت تغییرات
طرح بهینه	۵۷۲	---
افزایش هدایت هیدرولیکی	۵۵۷	٪ -۲/۵
کاهش هدایت هیدرولیکی	۶۰۲	٪ +۵

* مقادیر بر حسب میلیون تومان می‌باشد.



شکل ۸- نمودار همگرایی تحلیل حساسیت ضریب هدایت هیدرولیکی

میزان هدایت هیدرولیکی همچنین با تأثیر بر روی افت به صورت غیرمستقیم بر روی عمق مکش پمپ و در نتیجه هزینه انرژی مصرفی نیز تأثیر می‌گذارد که می‌تواند یکی از دلایل اختلاف میان جواب‌ها در حالات مختلف باشد. محل احداث چاه‌ها در حالات مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است.

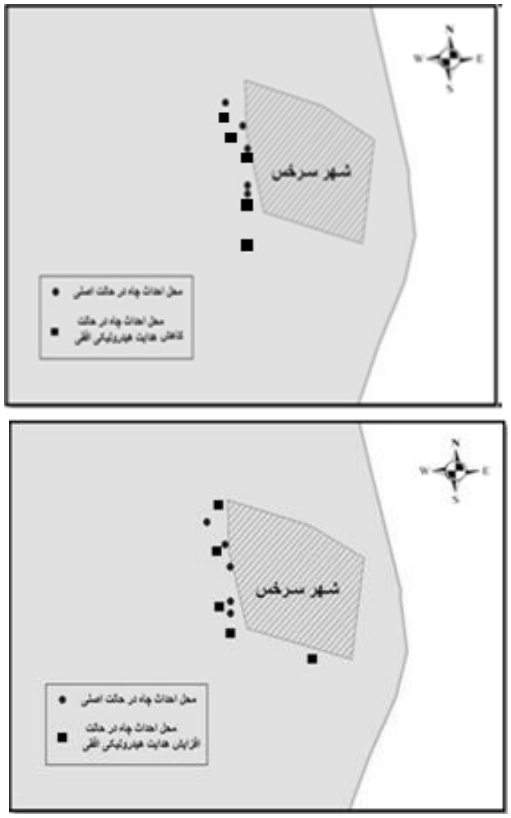
مقدار نرخ پمپاژ بیشینه بستگی به مشخصات آبخوان دارد و بر اساس آزمایش افت پله‌ای تعیین می‌شود. در مسئله حاضر با فرض انجام آزمایش پمپاژ برای چاه‌های موجود در ناحیه مورد مطالعه، از اطلاعات و نرخ پمپاژ بیشینه آن‌ها جهت حل مسئله استفاده شده است. تغییر نرخ پمپاژ بیشینه چاه با تأثیر در تعداد چاه‌های مورد نیاز و همچنین تأثیر در هزینه پمپ انتخابی در هزینه نهایی تأثیرگذار خواهد بود در نتیجه تحلیل حساسیت مدل نسبت به آن ضروری به نظر می‌رسد. بدین منظور مقدار نرخ پمپاژ در یک حالت دو برابر مقدار اولیه و در حالت دیگر نصف حالت مبنا قرار داده‌شده و مسئله حل شده است. نتیجه حاصل‌شده در قالب جدول ۷ و شکل ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۷- تحلیل حساسیت نرخ پمپاژ بیشینه

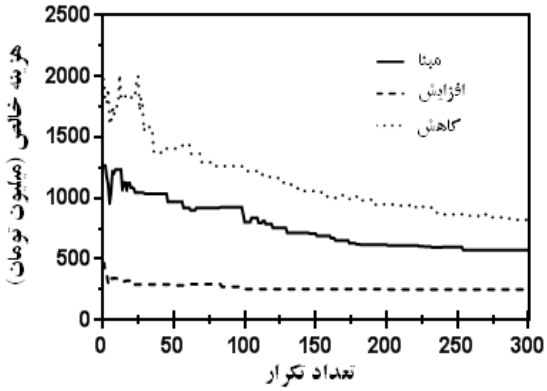
مشخصات طرح آبرسانی	هزینه خالص*	نسبت تغییرات
طرح بهینه	۵۷۲	---
افزایش نرخ پمپاژ بیشینه	۲۴۹	٪ -۵۶
کاهش نرخ پمپاژ بیشینه	۷۲۰	٪ +۲۵

* مقادیر بر حسب میلیون تومان می‌باشد.

افزایش دبی پمپاژ بیشینه در مسئله و در نتیجه اختصاص نرخ پمپاژ بالاتر توسط مدل به چاه‌ها، نیازمند استفاده از پمپ آب قوی‌تر و صرف هزینه بیشتر می‌باشد ولی از طرفی با بالا رفتن نرخ پمپاژ بیشینه، تعداد چاه‌های مورد نیاز برای تأمین نیاز آبی کاهش‌یافته 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 تأمین شده است و هزینه‌ها حدود ۵۶ درصد کاهش یافته‌اند. همچنین با کاهش نرخ پمپاژ، تعداد چاه مورد نیاز برای تأمین نیاز آبی به هفت حلقه افزایش یافته و هزینه‌ها ۲۶ درصد افزایش یافته است. نتایج نشان‌هنده حساسیت بالای مدل نسبت به نرخ پمپاژ بیشینه می‌باشد. در شکل ۱۱ آرایش چاه‌ها در دو حالت افزایش و کاهش دبی پمپاژ بیشینه نشان داده شده است.



شکل ۹- محل احداث چاه‌ها در حالت کاهش (بالا) و افزایش (پائین) هدایت هیدرولیکی

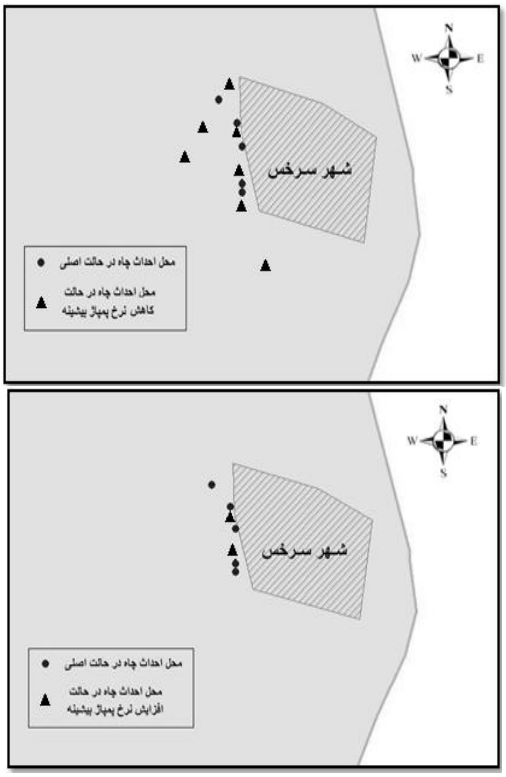


شکل ۱۰- نمودار همگرایی تحلیل حساسیت نرخ پمپاژ بیشینه

۴- جمع‌بندی

در تحقیق حاضر مسئله بهینه‌سازی جانمایی و نرخ پمپاژ چاه‌های برداشت از آبخوان با استفاده از مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی PSO-MODFLOW مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، مسئله مذکور در قالب مطالعه موردی طرح تأمین آب شرب شهر سرخس و با در نظر گرفتن ملاحظات کمی و کیفی پیاده‌سازی و حل شد که در

نهایت نتایج مناسبی حاصل گردید. نتایج حاصله نشان می‌دهد که هزینه طرح بهینه نسبت به طرح موجود تا حدود پنج درصد کاهش یافته است.



شکل ۱۱- محل احداث چاه‌ها در حالت کاهش (بالا) و افزایش (پائین) نرخ پمپاژ بیشینه

اختلاف کم میان هزینه طرح موجود و طرح بهینه نشان‌دهنده طراحی مناسب طرح کنونی تأمین آب شرب شهر سرخس می‌باشد. همچنین نتایج تحلیل حساسیت بیانگر این است که تغییرات پارامتر هدایت هیدرولیکی آبخوان تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر نتایج به دست آمده ندارد. در حالیکه تغییرات نرخ پمپاژ بیشینه با تأثیر مستقیم در تعداد چاه‌های موردنیاز باعث تغییرات چشمگیری در هزینه نهایی می‌شود. در این تحقیق علاوه بر پارامترهای کمی، میزان مواد جامد محلول در آب به عنوان یکی از پارامترهای کیفی منابع آب وارد مسئله جانمایی چاه‌های پمپاژ گردیده است. بررسی نتایج نهایی نشان می‌دهد با توجه به کیفیت نسبتاً مناسب منابع آب زیرزمینی در محدوده شهر سرخس (غلظت کمتر از ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و حساسیت کم هزینه نمک‌زدایی نسبت به تغییرات غلظت مواد جامد محلول در آب و همچنین تغییرات آرام غلظت این مواد در ناحیه تحت مطالعه، پارامتر هزینه تصفیه به عنوان نماینده شاخص کیفی در تابع هدف، نقشی چندانی در آرایش و تعیین مکان چاه‌ها نداشته و تنها در میزان نرخ پمپاژ چاه‌ها تأثیرگذار خواهد بود.

رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مورد استفاده در این تحقیق به دلیل برخورداری از قابلیت لحاظ نمودن جزئیات کمی و کیفی آبخوان در مدل شبیه‌سازی توزیعی MODFLOW و لحاظ متغیرهای تصمیم مسئله نظیر مکان و نرخ پمپاژ چاه‌ها در الگوریتم بهینه‌سازی PSO به خوبی قادر به حل مسائل طراحی جانمایی شبکه چاه‌های برداشت از منابع آب زیرزمینی می‌باشد. بدیهی است در شرایط بزرگ مقیاس بودن آبخوان تحت مطالعه و یا ضرورت انجام شبیه‌سازی آبخوان در حالت غیرماندگار، حل مسئله با استفاده از این رویکرد با مشکل زمان زیاد محاسبات مواجه گردد. در این شرایط می‌توان در خصوص استفاده از مدل‌های جایگزین (Meta-Models) نظیر شبکه‌های عصبی و یا ماشین‌های بردار پشتیبان که بتوانند نتایج مدل شبیه‌ساز را با دقت قابل قبولی تقریب بزنند، تحقیقات بیشتری را انجام داد.

پی‌نوشت‌ها

1- Monte Carlo
2- Simulated Annealing (SA)
3- Constrained Differential Dynamic Programming (CCDP)
4- Boundary Element Method (BEM)
5- Particle Swarm Optimization (PSO)
6- Support Vector Machines (SVM)
7- Harmony Search (HS)
8- Differential Evolution (DE)
9- Ant Colony Algorithm (ACA)
10- Function Stretching
11 Firefly Algorithm
12- Specific Flow
13- Total Dissolved Solids

۵- مراجع

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

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

Iran Ministry of Energy (2013) Standards code title 577. Iran Ministry of Energy Press, Tehran (In Persian).

Katsifarakis KL, Petala Z (2006) Combining genetic algorithms and boundary elements to optimize coastal aquifers management. Journal of Hydrology 327(1-2):200–207.

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 (In Persian)

Mantoglou A, Papantoniou M, Giannoulopoulos P (2004) Management of coastal aquifers based on nonlinear optimization and evolutionary algorithms. Journal of Hydrology 297(1-4)" 209–228.

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

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)

Park CH, Aral MM (2004) Multi-objective optimization of pumping rates and well placement in coastal aquifers. Journal of Hydrology 290(1-2):80–99.

Storck P, Eheart JW, Valocchi AJ (1997) A method for the optimal location of monitoring wells for detection of groundwater contamination in three-dimensional heterogeneous aquifers. Water Resources Research 33(9):2081

Todd DK, Mays LW (2005) Groundwater hydrology. John Wiley & Son, New Jersey

Toossab Consulting Engineers Company (2013) National water plan main report (Fifth volume: eastern basins). Iran Ministry of Energy Press, Tehran (In Persian)

Chaudhry S (2003) Unit cost of desalination. California Desalination Task Force, California Energy Commission, Sacramento, California

Conkling H (1946) Utilization of ground-water storage in stream system development. Transactions of the American Society of Civil Engineers 111(1):275–305

Davoodi MJ (2014) Dewatering optimization using firefly algorithm. M.Sc. Thesis, Shahid Beheshti University (In Persian)

Eberhart RC, Kennedy J (1995) A new optimizer using particle swarm theory. In: Proc. of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science (MHS-1995), 4-6 October, Nagoya, Japan, 39-43

Elçi A, Ayvaz 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

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

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)

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

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