مدیریت آب و آبیاری
دوره ۹ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۸
صفحه‌های ۲۱۰-۱۹۹

تهیه مدل MOPSO-GS جهت طراحی شبکه بهینه پایش کیفی آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت نیشابور)

محبوبه خداوردی[۱]، سید رضا هاشمی[۲*]، عباس خاشعی سیوکی[۳]، محسن پوررضا بیلندی[۴]
۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
۲. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
۳. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
۴. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۲۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۰

چکیده

بهینه‌سازی شبکه پایش، یک فرآیند تصمیم‌گیری برای داشتن بهترین ترکیب در بین ایستگاه‌های موجود است. به‌دلیل ملاحظات اقتصادی و کاستن از هزینه‌های پایش، رویکرد بهینه‌سازی در این پژوهش، کاهش ایستگاه‌های پایش بدون کاهش میزان و دقت اطلاعات حاصل می‌باشد. در پژوهش حاضر طراحی بهینه شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی به‌کمک مدلی بر پایه بهینه‌سازی در دشت نیشابور انجام گرفته است. بهینه‌سازی شبکه چاه‌ها توسط الگوریتم دو هدفه ازدحام ذرات (MOPSO) با اهداف کمینه نمودن مقدار ریشه مربعات میانگین خطا (RMSE) و کمینه نمودن تعداد چاه‌ها اجرا شد. در بخش شبیه‌سازی مسئله از روش درون‌یابی کریجینگ برای مقادیر غلظت کلراید آب زیرزمینی محاسباتی استفاده شد و با مقادیر مشاهداتی مقایسه شدند. نتایج این پژوهش، ارائه یک جبهه پارتو با نمایش تعداد چاه در مقابل RMSE متناظر آن بود که می‌تواند دستورالعملی برای طراحی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی باشد. به این صورت که با تعیین دقت لازم در داده های حاصل از شبکه پایش می‌توان تعداد چاه‌ها و موقعیت آن‌ها را در منطقه مطالعاتی مشخص نمود. پس از اجرای مدل MOPSO-GS نتایج بهینه‌سازی نشان داد که در آبخوان نیشابور تعداد چاه‌های نمونه‌برداری می‌تواند به اندازه ۵۸ درصد و با حداقل افزایش خطا (۵۰ چاه با خطای صفر به ۲۱ چاه با خطای غلظت کلراید ۱۳/۵۷ میلی‌گرم بر لیتر)، کاهش داده شود. هم‌چنین موقعیت این چاه‌ها به‌عنوان موقعیت بهینه در نظر گرفته شد.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم ازدحام ذرات، بهینه‌سازی دوهدفه، غلظت کلراید، کریجینگ.

Optimal Design of Groundwater-Quality Sampling Networks with MOPSO-GS (Case Study: Neyshabour Plain)

Mahbubeh Khodaverdi[1], Seyed Reza Hashemi[2*], Abbas Khashei Siuki[3], Mohsen Pourreza Bilondi[4]
1. Graduated M.Sc Water Resources Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
3. Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
4. Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
Received: October 14, 2019 Accepted: December 01, 2019

Abstract

Monitoring network optimization is a decision making process for the best combination of available stations. Due to economic considerations and reduction of monitoring costs, the optimization approach in this study is to reduce monitoring stations without reducing the amount and accuracy of the information obtained. In this study, an optimal design of groundwater quality monitoring network was carried out with the help of an optimization model in the Neishabour plain aquifer. The optimization of the wells network was accomplished by a Multi Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) algorithm. Two objectives containing of minimizing the root mean square error (RMSE) and the number of wells was applied in current research. Kriging interpolation was used for calculating groundwater chlorine concentration values and compared with observation values. As a result of this research was presented a Pareto front exctracted from MOPSO showing the number of wells against their corresponding RMSE, which could be a guide for the design of a groundwater quality monitoring network. The outcome showed that the sampling wells can be reduced to 58 percent with a minimum error increase (all 50 wells in base network with zero error may be reduced to 21 with chlorine concentration error of 13.57 mg/l) in the Neishabour aquifer. Also, the position of these wells was considered as the optimal position.

Keywords: Chlorine concentration, Kriging, Particle swarm algorithm, Two-objective optimization.

* نویسنده مسئول
Email: srhashemi@birjand.ac.ir

مقدمه

پایش کیفی آب‌های زیرزمینی یک گام ضروری در تشریح سیستم آب‌های زیرزمینی است و یک شبکه پایش می‌تواند اطلاعات کمی و کیفی لازم برای انجام تحقیق درباره کیفیت و کمیت محیطی فراهم آورد. یک سیستم صحیح طراحی شده نماینده ای از کیفیت ناحیه مورد پایش خواهد بود و انتخاب تعداد بهینه ناحیه پایش و توزیع مکانی بین آن‌ها یک نیاز آب شناس می‌باشد. از یک‌طرف توزیع نامناسب محل‌های پایش یا تعداد ناکافی آن دید مناسبی از کیفیت محیط را فراهم نخواهد کرد و از طرف دیگر چنانچه محل‌های نمونه‌برداری خیلی زیاد باشند اطلاعات به‌دست‌آمده زیاد بوده و شبکه پایش پرهزینه و ناکارا خواهد (۵).

مطالعه بر روی طراحی انواع شبکه‌های پایش منابع آب اعم از کمّی و کیفی از گذشته تا به امروز مورد توجه بوده است. از جمله مطالعاتی که در زمینه بهینه‌سازی منابع آب انجام شده است اشاره می‌شود به پژوهش قادری و همکاران (۳) که مدلی بر مبنای الگوریتم تکامل رقابتی جوامع (SCE)[1] برای مدل‌سازی بهره‌برداری بهینه از سیستم پیچیده چندمخزنی واقع در حوضه آبریز کرخه توسعه دادند. مسیر بهینه‌سازی سیستم موردنظر شامل تخصیص بهینه بین چهار منطقهٔ کشاورزی به‌منظور تأمین نیاز آبیاری با اولویت تأمین نیازهای زیست‌محیطی در هر بازه در دو رویکرد کوتاه‌مدت و بلندمدت بود. درنظرگرفتن سازوکار مناسب چرخ گردان در ساختار الگوریتم، به توسعه و افزایش کارایی و مقاومت الگوریتم SCE منجر شد. ابتدا اعتبارسنجی مدل توسعه داده‌شده توسط چند تابع استاندارد بررسی شد. نتایج بیانگر عملکرد مناسب مدل توسعه داده شده است. سپس این مدل برای حل مسئلهٔ بهره‌برداری از سیستم چند مخزنی حوضه آبریز کرخه استفاده شد. نتایج مدل با استفاده از معیارهای آماری و مقایسهٔ آن‌ها با نتایج الگوریتم شناخته‌شده ژنتیک ارزیابی شد. نتایج حاکی از عملکرد زیاد و تناسب الگوریتم SCE در بهره‌برداری بهینه از مخازن است. در پژوهش دیگری گنجی خرمدل و کیخایی (۷) منطقه‌ای از شمال ایران را انتخاب کردند تا توانایی الگوریتم ژنتیک (GA)[2] ترکیب‌شده با کریجینگ و الگوریتم اجزای جمعی (PSO)[3] را جهت بهینه‌سازی شبکه مقایسه و ارزیابی کنند، با این شرط که تعداد چاه‌های پایش طوری کاهش یابد که تا حد امکان از دقت داده‌ها کاسته نشود. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که در آبخوان آستانه- کوچصفهان تعداد چاه‌های مشاهده‌ای می‌تواند به اندازه ۲۶ درصد (۵۷ به ۴۲ چاه)، کاهش داده شود، بدون این‌که فقدان داده‌ای محسوسی ایجاد شود. یوسفی و همکاران (۱۸) از مدل بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO)[4] برای استفاده تلفیقی فاضلاب تصفیه‌شده و آب زیرزمینی در شبکه آبیاری ورامین استفاده کردند. سه هدف در نظر گرفته شد: به حداکثر رساندن مزایای استفاده از الگوهای زراعی، کاهش شست‌وشوی نیتروژن و بهبود میزان تغذیه آبخوان. نتایج نشان داد که مزایای به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی الگوهای کشت، بهره‌وری در مصرف آب و تغذیه آبخوان به‌ترتیب هفت درصد، ۴۷ درصد و ۱۵ درصد افزایش یافته است. اهداف مصرف تلفیقی فاضلاب تصفیه‌شده و آب‌های زیرزمینی و مصرف کود نیتروژن به‌ترتیب ۳۶ درصد و ۸۹ درصد کاهش یافته است. از نتایج این پژوهش می‌توان برای بهینه‌سازی استفاده از منابع آب، افزایش منافع کشاورزان و کاهش شست‌وشوی نیتروژن از شبکه‌های آبیاری و زهکشی استفاده کرد.

1.Shuffled Complex Evolution

2.Genetic Algorithm
3.Particle Swarm Optimization
4.Multi-Objective Particle Swarm Optimization

نمونه پژوهش‌هایی که با ایجاد مدل‌های ترکیبی به بهینه‌سازی می‌پردازند می‌توان اشاره کرد به رجایی و ابراهیمی (۲) که در تحقیقی، توانایی مدل ترکیبی موجک- شبکهٔ عصبی پویا را برای پیش‌بینی یک ماه آیندهٔ عمق آب زیرزمینی ارزیابی کردند و این مدل را با مدل‌های شبکهٔ عصبی و رگرسیون خطی چندمتغیره مقایسه کردند. داده‌های استفاده‌شده برای تشکیل مدل‌ها فقط عمق آب زیرزمینی ماهانه بود که در دو پیزومتر واقع در دشت قم به‌مدت ده سال اندازه‌گیری شده بودند. نتایج نشان داد عملکرد مدل شبکهٔ عصبی چندان رضایت‌بخش نیست. مدل رگرسیون خطی چندمتغیره نیز نتایج دقیقی نداشت و مقدار پیش‌بینی‌شده با این مدل در اکثر موارد بیش‌تر از مقدار واقعی بود، درحالی‌که مدل ترکیبی موجک- شبکهٔ عصبی با استفاده از موجک مادر Meyer با دو سطح تجزیه، توانست یک ماه آینده را با ضریب‌های نش ۰/۹۹۳ و ۰/۹۷٤ به‌ترتیب برای پیزومترهای ۱ و ۲ پیش‌بینی کند. در تحقیقی کاووسی و همکاران (٦) به کاربرد الگوریتم نوین شبیه‌ساز بهینه‌ساز LSSVM[1]-PSO در طراحی شبکه بهینه پایش تراز سطح آب زیرزمینی پرداختند. در این تحقیق از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات PSO به‌منظور تعیین تعداد و موقعیت بهینه چاه‌های مشاهداتی استفاده شده است. ابتدا، با استفاده از مدل حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان و با پارامترهای ورودی مختصات جغرافیایی، تبخیر، بارندگی دو ماه قبل، تراز سطح زمین و سطح ایستابی یک ماه قبل با تابع کرنل RBF[2] سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شد و تعداد ٤۲ چاه مشاهده‌ای بهینه به‌دست آمد. سپس، با ارتباط مدل LSSVM و مدل PSO موقعیت مناسب چاه‌های مشاهده‌ای تحت دو سناریو تعیین شد. در سناریوی نخست موقعیت تعداد چاه‌های مشاهده‌ای ثابت ٤۲ حلقه تعیین‌شده و در سناریوی دوم تعداد و موقعیت پیزومترها متغیر در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد با توجه به این‌که تابع هدف کمینه‌سازی اختلاف حد مشاهداتی و حد شبیه‌سازی است، در سناریوی نخست کمترین میزان اختلاف در تکرار ۱۸۰ با مقدار تابع هدف ۰/۹۸٦۵ ارزیابی شد. نتایج به‌دست‌آمده از سناریوی دوم نشان می‌دهد تعداد چاه‌های مشاهده‌ای برابر ۲۸ حلقه به‌دست آمد که بیان‌کننده کاهش ۵۵ درصدی تعداد پیزومترها نسبت به حالت اولیه است. در هر دو سناریو پراکندگی نقاط در قسمت‌های جنوبی به‌علت زیادشدن شیب هیدرولیکی آبخوان بیش‌تر شده و در قسمت‌های شمالی کمتر است. در این سناریو کمترین میزان خطا در تکرار ۳۳۸ با تابع هدف ۰/۹۱٤۵ به‌دست آمد. این بهینه‌سازی درجه اهمیت و برتری سناریوی دوم را نسبت به سناریوی نخست نشان می‌دهد. در پژوهشی، میرزایی ندوشن و همکاران (۱٦) روش بهینه‌سازی برای طراحی شبکه‌های پایش سطح آب زیرزمینی در آبخوان اشتهارد با اهداف به حداقل رساندن میزان RMSE[3] و کاهش تعداد چاه‌ها ارائه نمودند. سه سناریو برای بهینه‌سازی مکان چاه‌های مشاهده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. ۱- طراحی مجدد شبکه نظارت بدون توجه به چاه‌های موجود، ۲- بازنگری شبکه نظارت موجود، ۳- گسترش شبکه نظارت موجود. برای بهینه‌سازی شبکه از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب استفاده شده است. روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)[4] جهت تعیین سطح آب زیرزمینی در الگوریتم مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج مطالعه نشان داد که روش پیشنهادی با موفقیت طراحی شبکه‌های نظارت بر آب زیرزمینی که به دقت و

1. Least-Squares Support-Vector Machines
2. Radial-Basis Function
3. Root Mean Square Error
4. Inverse Distance Weighting

صحت عمل می‌کنند را بهینه می‌کند. گاور و همکاران (۱۳) کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی و بهینه‌سازی اجتماع ذرات را برای مدیریت منابع آب زیرزمینی حوضه رودخانه Dore فرانسه مورد بررسی قرار دادند. مدل ANN-PSO[1] توسعه‌یافته برای به‌حداقل‌رساندن هزینه پمپاژ چاهها از جمله هزینه خط لوله استفاده شد. تخلیه و محل چاه‌های پمپاژ به‌عنوان متغیر تصمیم‌گیری گرفته شد و از مدل ANN-PSO برای یافتن محل بهینه چاه‌ها استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل ANN می‌تواند بار محاسباتی را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد زیرا قادر به تجزیه و تحلیل سناریوهای مختلف است و مدل ANN- PSO قادر به شناسایی محل بهینه چاه‌ها است. بالاولیکار و همکاران (۱۰) مدل شبکه عصبی مصنوعی مبتنی بر بهینه‌سازی ازدحام ذرات را برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در منطقه اودوپی هندوستان به‌کار بستند. تمرکز این کار پژوهشی توسعه مدل پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی مبتنی بر ANN و مقایسه آن با مدل پیش‌بینی ترکیبی ANN-PSO است. پارامترهای مدل با استفاده از ترکیب‌های مختلف داده‌ها آزمایش می شوند. نتایج نشان می‌دهد که مدل ترکیبی مبتنی بر PSO-ANN، دقت پیش‌بینی بهتری را نسبت به تنها ANN نشان می‌دهد. رضایی و همکاران (۱۷) یک الگوریتم PSO چندهدفه مبتنی بر هیبرید فازی به نام F-MOPSO برای استفاده از آب تلفیقی و برنامه‌ریزی الگوی چند محصول بهینه با اهداف به حداقل‌رساندن کمبودها در تأمین نیازهای آبیاری، به حداکثررساندن پایداری منابع آب زیرزمینی و به حداکثررساندن مزایای خالص کشاورزی ارائه نمودند. مدل بهینه‌سازی در یک دوره شبیه‌سازی بلندمدت ۱۰ ساله انجام می‌شود که منجر به افزایش راندمان آبیاری یعنی کاهش تلفات آب، کاهش مصرف آب در واحد سطح زیر کشت شده و افزایش بهره‌وری آب در مقایسه با معیارهای مشابه مشاهده‌شده در عملکرد واقعی می‌شود. جلالکمالی (۱٤) در پژوهشی استفاده از مدل‌های هیبرید فازی برای پیش‌بینی پارامترهای کیفی فضایی زمانی آب زیرزمینی مورد بررسی قرار داده است. در این مطالعه تعدادی از روش‌های ترکیبی مانند سیستم استنتاج فازی تطبیقی عصبی (ANFIS)[2] با الگوریتم ژنتیک (GA) و ANFIS با بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) را برای شبیه‌سازی سه پارامتر کیفیت آب زیرزمینی در دشت کرمان (از جمله غلظت کلراید، برق رسانایی (EC) و PH) ادغام شده است. در این پژوهش توانایی‌های تکنیک‌های ترکیبی و هم‌چنین پیش‌بینی کیفیت آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که هر دو مدل کارایی قابل‌قبولی در شبیه‌سازی فضایی و زمانی کیفیت آب‌های زیرزمینی نشان می دهند. این مطالعه هم‌چنین نشان داد که نوسانات سطح آب زیرزمینی در سراسر سفره آب و هم‌چنین بارندگی به‌عنوان دو عامل مهم در پیش‌بینی کیفیت آب زیرزمینی نقش دارد.

در پژوهش حاضر به ارائه مدلی شبیه‌ساز–بهینه‌ساز پرداخته می‌شود که با استفاده از روش کریجینگ به بررسی تغییرات مکانی و میان‌یابی غلظت کلراید در آب زیرزمینی پرداخته است، سپس با استفاده از الگوریتم فراابتکاری MOPSO شبکه پایش در سطح آبخوان را بهینه‌سازی می‌کند. بنابراین مدل ارائه‌شده دارای دو هدف کمینه‌نمودن مقدار ریشه مربعات میانگین خطا (RMSE) و کمینه‌نمودن تعداد چاه‌ها می‌باشد. بررسی مطالعات انجام‌شده نشان داد تاکنون پژوهشی که با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه بر پایه درون‌یابی کریجینگ (MOPSO-GS)[3] به بهینه‌سازی شبکه پایش کیفی بپردازد انجام نشده است.

1. Artificial Neural Network

2. Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System
3. Geostatistics

مواد و روش‌ها

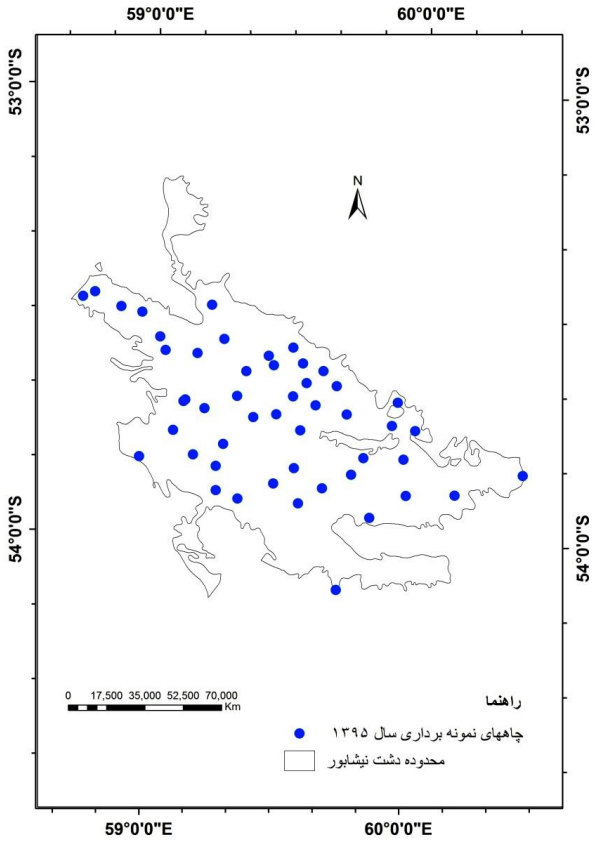
معرفی منطقه مورد مطالعه

دشت نیشابور جزیی از حوضه آبریز کال‌شور نیشابور می‌باشد که در دامنه جنوبی ارتفاعات بینالود و در شمال‌شرق کویر مرکزی ایران واقع شده است. این حوضه در طول جغرافیایی′۱۳ ۵۸ تا ′ ۳۰ ° ۵۹ و عرض جغرافیایی ′ ٤٠ ٣٥ تا ′ ٣٩ ٣٦ واقع شده و از شمال به خط‌الرأس ارتفاعات بینالود، از شرق به بلندی‌های لیلاجوق و یال‌پلنگ، ازجنوب به تپه ماهورهای نیزه‌بند، سیاه‌کوه و کوه‌نمک و از غرب به حوضه آبریز دشت سبزوار محدود می‌شود (۱). وسعت کل حوضه۷۳۵۰ کیلومترمربع است که۳۱٦۰ کیلومترمربع آن را ارتفاعات و بقیه آن یعنی٤١٩٠ کیلومترمربع را دشت تشکیل می‌دهد. شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد (۱).

پایین‌ترین نقطه در محل خروجی دشت (حسین‌آباد جنگل) در سمت غربی دشت قرار دارد که حدود ۱۰۵۰ متر از سطح دریا بالاتر است. طبق مطالعات انجام‌شده، آبخوان دشت نیشابور آزاد و تک‌لایه‌ای بوده و رسوبات تشکیل‌دهنده آن بر روی سنگ کف رسی میوسن قرار گرفته است (۹). دشت نیشابور دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک با متوسط درجه حرارت سالانه حدود ١٤/٥ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی سالانه حدود ۲۵۰ میلی‌متر می‌باشد (٤).

داده‌های موجود از مقادیر اندازه‌گیری‌شده غلظت کلراید آب زیرزمینی در چاه‌های نمونه‌برداری محدوده آبخوان نیشابور مورد بررسی قرار گرفت و چاه‌های با داده‌های اشتباه یا ناقص حذف گردید. برای انجام این پژوهش از آمار مربوط به سال ۱۳۹۵ با ۵۰ حلقه چاه نمونه‌برداری مطابق شکل (۲) استفاده گردید که دارای اطلاعات نسبتاً کاملی از موقعیت چاه‌ها و مقادیر غلظت کلراید اندازه‌گیری‌شده بودند.

شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه (منطقه زرد رنگ)



شکل ۲. موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری سال ۱۳۹۵ (۵۰ چاه) در دشت نیشابور

مدل بهینه‌سازی MOPSO-GS

برای مسئله بهینه‌سازی طراحی شبکه پایش، لازم است یک مدل طراحی شبکه پایش تعریف شود. دو تابع هدف مسئله عبارتند از: ۱- کمینه‌کردن تعداد چاه‌های نمونه‌برداری در محدوده آبخوان به‌عنوان نماینده هزینه‌های احداث، نگهداری و اندازه‌گیری غلظت کلراید آب زیرزمینی و ۲- کمینه‌نمودن خطای بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی مقدار غلظت کلراید در تمام نقاط پتانسیل محدوده آبخوان معرف دقت شبکه پایش. در بخش شبیه‌سازی مدل MOPSO-GS، برای ارزیابی شبکه پیشنهادی ابتدا به‌کمک روش درون‌یابی دقیق، قابل اعتماد و قابل کدگذاری کریجینگ، مقادیر محاسباتی کلراید آب زیرزمینی برای تمام نقاط شبکه پیشنهادی به‌دست می‌آید. سپس RMSE شبکه طبق رابطه (۱) با استفاده از مقادیر محاسباتی به‌دست‌آمده از کریجینگ و مقادیر مشاهداتی نقاط شبکه موجود در پایگاه داده تعیین و به‌عنوان تابع هدف اول معرفی می‌شود. از طرفی تعداد چاه‌های شبکه نیز مشخص و کم‌کردن آن نیز به‌عنوان تابع هدف دوم مسئله، رابطه (۲) تعریف می‌گردد.

$$F_1(x) = \min \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m} (C_{c_{est,i}} - C_{c_{act,i}})^2}{m}} \qquad (۱)$$

m: تعداد چاه‌های پایش حذف شده، $C_{C_{a\,c,i}}$: غلظت کلراید مشاهداتی چاه حذف‌شده iام، $C_{C_{est,i}}$: غلظت کلراید تخمین‌زده‌شده چاه حذف‌شده iام و i براساس چاه‌های حذف‌شده تعیین می‌شود.

$$\text{Minimize } F_2 = \text{No.Wells} \qquad (۲)$$
$$<۵۰ < \text{No.Wells} ۱۵$$

لازم به ذکر است محل انتخابی حفر چاه باید در محدوده آبخوان باشد.

مراحل طراحی مدل MOPSO-GS در شکل (۳) نشان داده شده است.

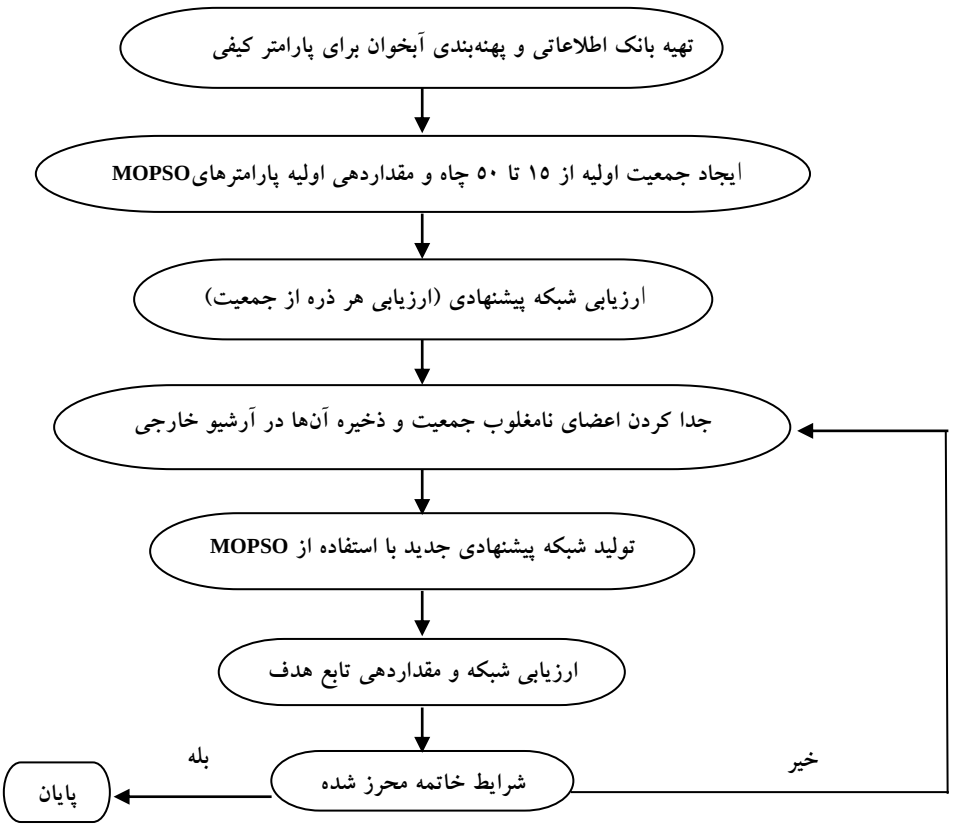
درون‌یابی مقدار غلظت کلراید با روش مبتنی بر زمین آمار

هنگامی‌که مقادیر یک متغیر برای مجموعه‌ای از نقاط نمونه در یک منطقه در دسترس باشند، می‌توان از روش‌های درون‌یابی فضایی برای تعیین مقدار متغیر در هر نقطه دیگری استفاده کرد. درون‌یابی فضایی را می‌توان به روش‌های قطعی (مثل اسپلاین‌ها و توابع پایه شعاعی) و زمین آمار (مثل IDW، کریجینگ، مدل‌های مرتبه‌ای و کاپیولا) تقسیم نمود. روش اول برای محاسبه مقادیر از تابع ریاضی استفاده می‌کند و مقدار محاسبه‌شده یک عدد قطعی است. روش دوم از برآوردهای احتمالاتی مثل واریانس بهره می‌برد.

یکی از روش‌های اصلی زمین آمار کریجینگ، نام دارد. انواع مختلف کریجینگ شامل ساده، معمولی، جهانی، رگرسیون، کوکریجینگ و ... می‌باشند که کریس (۱۲) به تفصیل آن‌ها را معرفی نمود. فرآیند کریجینگ ساده شامل دو بخش اصلی است. بخش اول ساخت نیم تغییرنمای تجربی است:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \left[Z(x_i + h) - Z(x_i) \right]^2 \qquad (۳)$$

که در آن $\gamma^*(h) =$ مقدار تخمینی از نیم تغییرنما با تأخیر h، N(h)= تعداد جفت‌های تجربی که با بردار h جدا شده‌اند، $Z(x_i)$ و $Z(x_i + h)$= مقادیر متغیر به‌ترتیب در نقاط با موقعیت x_i و x_i+h هستند.



شکل ۳. مراحل طراحی مدل MOPSO-GS

پس از ایجاد نیم تغییرنمای تجربی لازم است یک مدل پارامتری یا غیر پارامتری به آن برازش داده شود و از مدل‌های شاخص می‌توان به کروی، نمایی گوسین و خطی اشاره نمود. در گام بعدی، وزن‌های λ_j مربوط به رابطه درون‌یابی (٤) در روند حل کریجینگ توسط رابطه (٥) محاسبه می‌شوند.

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{j=1}^{J} \lambda_j Z(x_j) \qquad (٤)$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{N} \lambda_j (x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x_0) \\ \sum_{j=1}^{N} \lambda_j = 1 \end{cases} \qquad (٥)$$

$$i = 1,2,3,\ldots,N$$

که در آن، λ_j = وزن‌های مربوط به نقاط x_i، μ = ضرایب لاگرانژ و $\gamma(x_i, x_j)$ = نیم تغییرنمای بین دو نقطه x_j و x_i هستند. تخمین کمینه خطای مربعات که معرف دقت تخمین‌های کریجینگ است، به نام واریانس تخمین یا واریانس کریجینگ شناخته می‌شود و به‌صورت زیر است:

$$\sigma_k^2(x_0) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \gamma(x_i, x_0) + \mu \qquad (٦)$$

که در آن، $\sigma_k^2(x_0)$ = واریانس تخمین کریجینگ در نقطه x_0 است.

الگوریتم بهینه‌سازی

الگوریتم‌های فراابتکاری الگوریتم‌هایی هستند که با الهام از طبیعت، فیزیک و انسان طراحی شده‌اند و در حل بسیاری از مسایل بهینه‌سازی استفاده می‌شوند. معمولاً از الگوریتم های فراابتکاری در ترکیب با سایر الگوریتم ها، جهت رسیدن به جواب بهینه یا خروج از وضعیت جواب بهینه محلی استفاده می‌گردد. این الگوریتم‌ها با اجرای فرآیند جستجو در فضای تصمیم به مجموعه جو آب‌های پارتو دست می‌یابند.

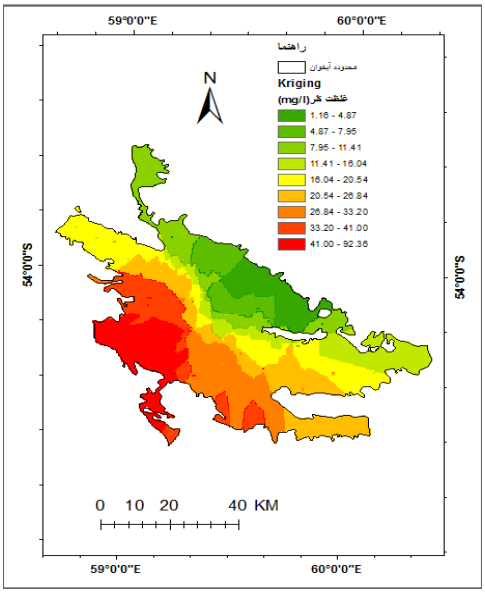
الگوریتم فراابتکاری PSO یک روش جدید بهینه‌سازی است که با استفاده از همانندسازی رفتارِ گروهیِ موجودات طبیعی در اوایل دهه ۱۹۹۰ ابداع شد. کندی و ابرهارت (۱۵) بهینه‌سازی ذرات انبوه (PSO) را براساس شبیه‌سازی از توده‌های پرندگان و دسته ماهی‌ها توسعه دادند. هر ذره تجارب قبلی خود را در PSO مبادله می‌کند. کلرک و کندی (۱۱) با ایجاد تغییراتی در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات این الگوریتم را برای مسائل چندهدفه توسعه داده‌اند. تفاوت اصلی MOPSO با PSO در تعیین بهترین ذره در جمعیت و هم‌چنین تعیین بهترین خاطره شخصی هر ذره می‌باشد. در الگوریتم MOPSO یک مفهوم جدید به نام آرشیو نسبت به حالت تک‌هدفه ارائه شده است که در واقع محل نگهداری پاسخ‌های نامغلوب است. با تعریف آرشیو در این الگوریتم مفهوم بهترین ذره در جمعیت نیز تغییر پیدا کرده است. در این تحقیق به‌دلیل دوهدفه‌بودن مدل ارائه‌شده از الگوریتم MOPSO بهره گرفته شده است.

نتایج و بحث

داده‌های مربوط به اندازه‌گیری غلظت کلراید آب زیرزمینی از ۵۰ حلقه چاه نمونه‌برداری در سال ۱۳۹۵، از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی آبخوان موردمطالعه تهیه شد. حل مسئله بهینه‌سازی دوهدفه طراحی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی با بهره‌گیری از الگوریتم MOPSO انجام شد، زیرا این الگوریتم قادر به حل مسائل با بیش از یک هدف است، برای حل مسائل سنگین قابل اطمینان است و عملکرد بالای آن در پژوهش‌های گذشته اثبات شده است. پارامترهای در نظر گرفته‌شده در MOPSO شامل تعداد تکرار، تعداد جمعیت، اندازه آرشیو

خارجی، ضریب اینرسی، به‌ترتیب مقادیر ۱۰، ۳۶، ۵۰ و ۰/۵ می‌باشند. هم‌چنین بیشینه و کمینه تعداد چاه‌های شبکه پایش به‌ترتیب ۵۰ و ۱۵ چاه انتخاب شد تا فضای جستجوی بهینه‌سازی برای MOPSO نامحدود نباشد و در بازه مشخصی به‌دنبال جو آب‌های بهینه باشد.

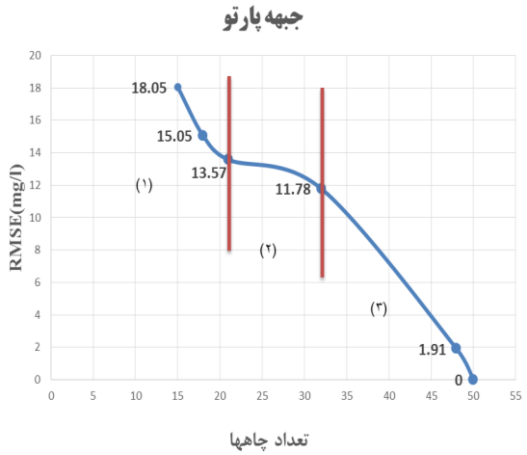
شکل (٤) نمایی از درون‌یابی کریجینگ دشت نیشابور با استفاده از مقادیر کلراید در ۵۰ حلقه چاه نمونه‌برداری است که به‌کمک آن می‌توان مقدار کلراید را در تمام نقاط دشت تخمین زد.



شکل ٤. پهنه‌بندی مقدار کلراید دشت نیشابور با استفاده از تمام ۵۰ چاه

مطابق شکل (٤) در قسمت شمالی دشت نیشابور کمترین مقدار غلظت کلراید و در بخش جنوبی آن به‌خصوص جنوب‌غربی بیش‌ترین مقدار غلظت کلراید را می‌توان شاهد بود.

پس از اجرای مدل MOPSO-GS در محیط نرم‌افزار متلب نتایج نهایی در آرشیو خارجی ذخیره می‌شود که شکل (۵) منحنی جبهه پارتو برای یک اجرا را نمایش می‌دهد. منظور از مجموعه جواب بهینه پارتو[1] مجموعه جو آب‌های مسلط نشدنی در تمام فضای جستجو است که ن می‌توان در این دو مجموعه بین دو جواب مختلف یکی را به دیگری برتری داد یعنی الگوریتم سعی در رسیدن به جواب مختلف بهینه پارتو دارد.



شکل ۵. جبهه پارتو حاصل از اجرای مدل MOPSO-GS

همان‌طورکه در شکل (۵) مشاهده می شود منحنی جبهه پارتو از سه قسمت تشکیل شده است: ۱- تعداد چاه‌های کمتر از ۲۱ چاه، ۲- تعداد چاه‌های ۳۲-۲۱ که شیب منحنی در این قسمت بسیار کم و ناچیز می‌باشد، ۳- تعداد چاه‌های ۵۰-۳۲ که منحنی دارای شیب زیادی است.

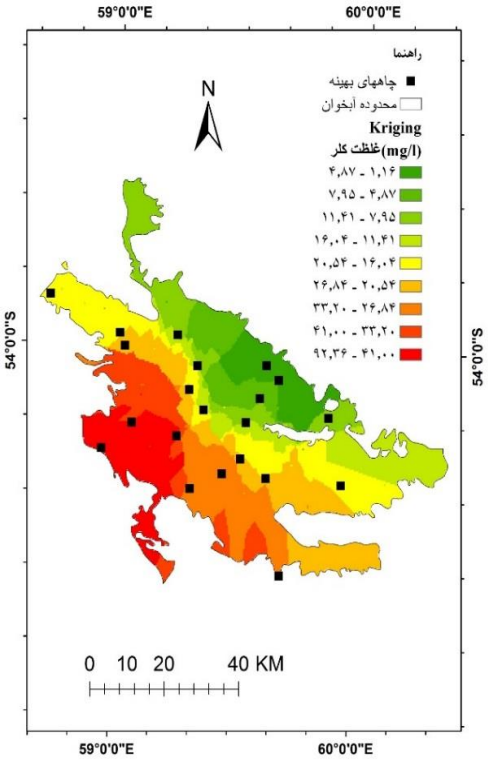
در قسمت اول با فرض حداقل تعداد چاه‌ها (در اینجا ۱۵ به‌عنوان حداقل چاه‌ها فرض گردید) هرچه تعداد چاه بیش‌تر می‌شود دقت با شیب زیاد افزایش و هم‌زمان خطا نیز کاهش می‌یابد. این روند تا رسیدن تعداد چاه به ۲۱ ادامه دارد. در قسمت دوم از تعداد ۲۱ تا ۳۲ چاه، خطای غلظت کلراید با شیب یکنواخت و دقت یکسان (بین ۱۳/۵۷ mg/l- ۱۱/۷۸) تغییر می‌کند که این اختلاف بسیار کم و در حد ۱/۷۹ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. بنابراین مهم‌ترین عامل در

1. Pareto Optimal Set

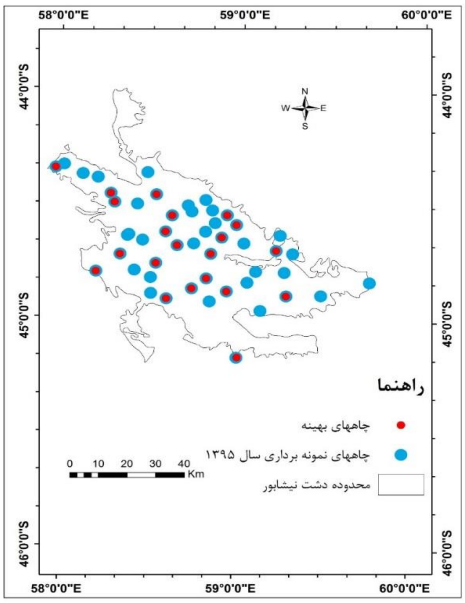
انتخاب تعداد چاه‌ها در این محدوده، توجه به کاهش هزینه‌های نمونه‌برداری و اندازه‌گیری غلظت کلراید و هم‌چنین صرفه‌جویی در زمان می‌باشد که در این صورت انتخاب تعداد ۲۱ چاه مناسب به‌نظر می‌رسد. در قسمت سوم منحنی همان‌طورکه ملاحظه می‌شود با کاهش تعداد ۱۸ چاه از ۵۰ چاه نمونه‌برداری، خطا با شیب زیاد افزایش یافته و از صفر به ۱۱ میلی‌گرم بر لیتر رسیده و دقت نیز کاهش یافته است. در این قسمت تعداد چاه‌های نمونه‌برداری از ۳۲ تا ۵۰ افزایش یافته است.

پس با بررسی این منحنی جبهه پارتو می‌توان نتیجه گرفت که تعداد بهینه چاه‌های نمونه‌برداری باید ۲۱ یا ۵۰ چاه باشد که با توجه به اهداف بهینه‌سازی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی یعنی کاهش هزینه‌های پایش، اندازه‌گیری غلظت کلراید و صرفه‌جویی در زمان، با انتخاب تعداد بهینه ۲۱ چاه با افزایش حداقلی خطا همان نتایج ۵۰ چاه به‌دست می‌آید. بنابراین با توجه به شکل (۳) تعداد بهینه ۲۱ چاه از ۵۰ چاه نمونه‌برداری با مقدار RMSE برابر ۱۳/۵۷ mg/l می‌تواند یکی از بهترین جو آب‌ها باشد؛ همان‌طورکه در پژوهش گنجی خرمدل و همکاران (۸) پس از بهینه‌سازی شبکه پایش تراز آب زیرزمینی تعداد بهینه ٤۲ چاه از ۵۷ چاه مشاهده‌ای با مقدار خطای ۰/۳۲۲۲ متر انتخاب شد.

پس از تعیین تعداد بهینه چاه‌ها، می‌توان موقعیت آن‌ها را که همان موقعیت بهینه چاه‌های نمونه‌برداری غلظت کلراید می‌باشد؛ به‌صورت شکل‌های (٦) و (۷) در حوضه دشت نیشابور تعیین کرد. ازآنجایی‌که در مناطقی با تغییرات زیاد غلظت کلراید نیاز به چاه‌های نمونه‌برداری بیش‌تری است؛ با بررسی موقعیت بهینه چاه‌ها در شکل (٦) مشاهده شد که در مرکز دشت به‌دلیل تغییرات زیاد مقدار غلظت کلراید، مدل MOPSO-GS نیز تعداد بیش‌تری از چاه‌های نمونه‌برداری بهینه را از آن قسمت انتخاب نموده است.



شکل ٦. نمایش موقعیت بهینه چاه‌ها (۲۱ حلقه چاه) در نقشه پهنه‌بندی کلراید



شکل ۷. موقعیت بهینه ۲۱ چاه انتخابی از ۵۰ چاه نمونه‌برداری

نتیجه‌گیری

شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی نقش ویژه‌ای در مطالعات آب زیرزمینی، کاهش وقت و هزینه‌ها ایفا می‌کند؛ بنابراین در این تحقیق سعی شده است با ارائه یک مدل بهینه‌ساز، شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی طراحی گردد. طراحی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی با درنظرگرفتن تمام نقاط پتانسیل در محدوده آبخوان طراحی می‌گردد. به این معنی که طراحی شبکه پایش از یک چاه تا هر چند چاه انجام می‌شود و فضای جستجوی الگوریتم بهینه‌سازی تمام نقاط پتانسیل محدوده آبخوان است. برای بهینه‌سازی از الگوریتم قدرتمند و پرکاربرد MOPSO استفاده شد و برای محاسبه مقادیر محاسباتی کلراید آب زیرزمینی در شبیه‌ساز از درون‌یابی کریجینگ بهره گرفته شد. در این تحقیق مشاهده شد که می‌توان با کمک مدل MOPSO-GS شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی را بهینه‌سازی کرد و درنهایت جواب مسئله به‌صورت یک جبهه پارتو به‌دست آمد که می‌توان با تعیین دقت مورد نیاز از داده‌برداری در شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی، تعداد و موقعیت بهینه چاه‌های مشاهداتی را در منطقه مشخص نمود. در پژوهش حاضر تعداد بهینه ۲۱ چاه با مقدار RMSE برابر ۱۳/۵۷ mg/l یکی از جو آب‌های منطقی برای بهینه‌سازی شبکه پایش کیفی منطقه مطالعاتی با استفاده از مدل MOPSO-GS می‌باشد. هم‌چنین موقعیت این چاه‌ها به‌عنوان موقعیت بهینه در نظر گرفته شد.

منابع

۱. خاشعی سیوکی، ع.، قهرمان، ب. و کوچک زاده، م. (۱۳۹۲). مقایسه مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، ANFIS و رگرسیونی در برآورد سطح ایستابی آبخوان دشت نیشابور. آبیاری و زهکشی ایران. ۷ (۱): ۱۰-۲۲.

۲. رجایی، ط. و ابراهیمی، ه. (۱۳۹۳). مدل‌سازی نوسان‌های ماهانهٔ آب زیرزمینی به‌وسیلهٔ تبدیل موجک و شبکهٔ عصبی پویا. مدیریت آب و آبیاری. ٤ (۱): ۷۳-۸۷.

۳. قادری، ک.، زلقی، آ. و بختیاری، ب. (۱۳۹۳). بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم چندمخزنی با استفاده از الگوریتم تکامل رقابتی جوامع (SCE) (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ کرخه). مدیریت آب و آبیاری. ٤ (۲): ۲۱۵-۲۲۸.

٤. قائمی، م.، آستارایی، ع. و ثنایی نژاد، س.ح. (۱۳۹۰). ارزیابی تغییرات مکانی و تخمین کربن آلی خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک با استفاده از توابع انتقالی و امکان‌سنجی آن با داده‌های سنجش از دور (مطالعه موردی: منطقه نیشابور). پژوهش‌های زراعی ایران. ۹ (۲): ۲۹٤-۳۰۰.

۵. قربان‌زاده، ر.، رضایی، م.، جعفری راد، ع. و دانبیان، ح. (۱۳۷٤). بهینه‌سازی شبکه پایش کیفی آلودگی منابع آب زیرزمینی در دشت دزفول- اندیمشک با استفاده از تکنیک زمین آمار و GIS. پانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.

٦. کاووسی، م.، خاشعی سیوکی، ع.، پوررضا بیلندی، م.، نجفی، م.ح. (۱۳۹۷). کاربرد الگوریتم نوین شبیه‌ساز بهینه‌ساز LSSVM-PSO در طراحی شبکه بهینه پایش تراز سطح آب زیرزمینی. اکوهیدرولوژی. ۵(٤): ۱۳۰۹-۱۳۱۹.

۷. گنجی خرمدل، ن.، کیخایی، ف. (۱۳۹۵). طراحی بهینه چاه‌های مشاهده‌ای در یک شبکه پایش سطح آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم فوق ابتکاری ژنتیک. مدیریت حوزه آبخیز. ۷ (۱٤): ۱۵۹-۱٦۵.

۸ گنجی خرمدل، ن.، کیخایی، ف.، محمدی، ک.، منعم، م.ج. (۱۳۹٤). بهینه‌سازی شبکه پایش تراز آب زیرزمینی با استفاده از روش فراکاوشی اجزای جمعی. علمی- پژوهشی هیدرولیک. ۱۰ (۱): ۲۵-۳۵.

۹. ولایتی، س.، توسلی، س. (۱۳۷۰). منابع و مسائل آب استان خراسان. مؤسسه چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد. ۲۷۹ صفحه.

10. Balavalikar, S., Nayak, P., Narayan Shenoy, N. & Nayak, K. (2018). Particle swarm optimization based artificial neural network model for forecasting groundwater level in Udupi district. *AIP Conference Proceedings*. 1952 (1).
11. Clerc, M. & Kennedy, J. (2002). The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(6): 58-73.
12. Cressie, N.A.C. (1991). Statistics for spatial data. John Wiley & Sons, New York.
13. Gaur, S., Ch, S., Graillot, D., Chahar, B.R., and Kumar, D. N. (2013). Application of Artificial Neural Networks and Particle Swarm Optimization for the Management of Groundwater Resources. *Water Resources Management*, 27 (3): 927-941.
14. Jalalkamali, A. (2015). Using of hybrid fuzzy models to predict spatiotemporal groundwater quality parameters. *Earth Science Informatics*, 8 (4): 885-894.
15. Kennedy, J. and Eberhart, R.C. (2001). Swarm Intelligence. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, California.
16. Mirzaie-Nodoushan, F., Bozorg-Haddad O., and Loáiciga, H.A. (2017). Optimal design of groundwater-level monitoring networks. *Hydroinformatics*. 1-10.
17. Rezaei, F., Safavi, H., and Zekri, M. (2017). A Hybrid Fuzzy-Based Multi-Objective PSO Algorithm for Conjunctive Water Use and Optimal Multi-Crop Pattern Planning. *Water Resources Management*, 31 (4): 1139-1155.
18. Yousefi, M., EbrahimBanihabib, M., Soltani, J., and Roozbahani, A. (2018). Multi-objective particle swarm optimization model for conjunctive use of treated wastewater and groundwater. *Agricultural Water Management*, 208: 224-231.