

## بازطراحی شبکه پایش آب زیرزمینی آبخوان کوهدشت

سیدجواد ساداتی نژاد<sup>۱</sup>، لیلا قاسمی<sup>۲</sup>، حسین یوسفی<sup>۱\*</sup>

۱. دانشیار، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد اکوهیدرولوژی، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۲/۱۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۶/۲۵)

## چکیده

شبکه‌های نظارت طولانی مدت آب‌های زیرزمینی می‌توانند اطلاعات لازم برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب را فراهم کنند. محدودیت‌های بودجه در سازمان‌های مدیریت منابع آب اغلب به معنای کاهش تعداد چاه‌های مشاهده‌ای موجود در یک شبکه پایش آب زیرزمینی است. به دلیل ملاحظات اقتصادی و کاهش هزینه‌های پایش، هدف بهینه‌سازی در پژوهش حاضر، کاهش ایستگاه‌های پایش است. در پژوهش حاضر از الگوریتم فوق‌ابتکاری ژنتیک در طراحی شبکه بهینه پایش سطح آب استفاده شد. هدف از انجام بهینه‌سازی، تعیین یک ترکیب بهینه از میان شبکه اصلی چاه‌های مشاهده‌ای بود، به طوری که امکان کمترین خطای اندازه‌گیری و کمترین فقدان داده و بهترین پراکنش چاه‌ها فراهم شود. با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک شبکه پایش آب زیرزمینی منطقه بهینه‌سازی شد. از بین ۱۵ حلقه چاه پیرومتری موجود در دشت کوهدشت، ۱۳ حلقه چاه دارای داده بودند. برای انجام تحقیق حاضر از داده‌های ۳۶ ماه متوالی، یعنی داده‌های ۱۳۹۲-۱۳۹۴ استفاده شد. با استفاده از الگوریتم ژنتیک شبکه پایش آب زیرزمینی از نو طراحی شده و چاه‌های مد نظر از بین نقاط پتانسیل انتخاب شدند. در نهایت، نتیجه مطلوب و بهینه مد نظر از بین نتایج به دست آمده از تکرارهای مختلف در الگوریتم ژنتیک انتخاب شد و از بین تعداد کل نقاط پتانسیل، ۲۸ چاه کمترین RMSE یعنی ۰/۱۱ و بهترین پراکنش را داشتند. موقعیت چاه‌های به دست آمده با تعدادی از چاه‌های موجود نزدیکی داشت. همچنین، نتیجه به دست آمده با ضوابط طراحی شبکه پایش کمی آب زیرزمینی مطابقت دارد که کارآمدی این روش را نشان می‌دهد.

**کلیدواژه‌گان:** الگوریتم رتبه‌بندی نامغلوب، بهینه‌سازی، چاه مشاهده‌ای، روش‌های فراابتکاری، شبکه پایش.

## مقدمه

آب یکی از اجزای حیاتی زندگی است که وجود آن برای بسیاری از فعالیت‌های اقتصادی ضرورت دارد. آب شیرین در کره زمین فقط حدود ۳ درصد از کل آب موجود بوده و فقط ۰/۳۶ درصد آن قابل استفاده است. فراوان‌ترین منبع قابل دسترس آب شیرین در دنیا آب زیرزمینی است که ۹۷ درصد منابع کل آب شیرین (به جز یخ‌های قطبی و یخچال‌ها) را تشکیل می‌دهد و گاهی ثروت پنهان نامیده می‌شود، چراکه وجود و اهمیت آن به خوبی شناخته نشده است. به همین دلیل، اقدامات لازم و مؤثری به منظور حفاظت و مدیریت آن با روش‌های پایدار محیط زیستی، یا انجام نمی‌شود یا بسیار دیر صورت می‌گیرد و اغلب در زمان وقوع خشکسالی در بعضی مناطق، اهمیت آن بیشتر قابل رؤیت است.

یکی از منابع بسیار مهم تأمین آب مورد نیاز بشر، آب‌های زیرزمینی اند. انجام عملیات پایش برای دستیابی به اطلاعات کافی درباره ویژگی‌های کمی و کیفی آب زیرزمینی ضروری است. در این حالت پایش سطح ایستابی (تراز آب زیرزمینی) به‌عنوان یک پارامتر بااهمیت در مطالعات آب زیرزمینی اهمیت زیادی دارد. شبکه پایش سطح ایستابی، از مجموعه‌ای چاه‌های مشاهده‌ای تشکیل می‌شود و با توجه به هزینه‌های زیادی که حفر چاه دارد و اندازه‌گیری مستمری که باید صورت گیرد، هدف اصلی از بهینه‌سازی، بررسی کیفیت استقرار یافتن چاه‌های مشاهده‌ای بر اساس معیارهای جانمایی و استانداردهای موجود است [۱].

فروغی و رضایی با استفاده از روش زمین‌آمار، شبکه پایش سطح آب زیرزمینی در دشت تبریز را از نظر تعداد و محل قرارگیری چاه‌های مشاهده‌ای بهینه‌سازی کردند. ۱۵۴ چاه مشاهده‌ای در این شبکه بررسی شد. نتایج پژوهش آنها نشان داد می‌توان با داشتن حداقل ۶۱ درصد از کل داده‌ها، ارتفاع سطح آب در بقیه چاه‌ها را با سطح اطمینان ۹۵ درصد تخمین زد. افزایش چاه در شبکه نمونه‌برداری و نیز تغییر مکان چاه‌ها، تأثیری در کاهش خطای تخمین نداشت [۲]. احمدوند و همکارانش به منظور بهینه‌سازی شبکه پایش از روش کلونی مورچگان و بهینه‌سازی استوار استفاده کردند. با مطالعه موردی شبکه پایش دشت همدان - بهار مشتمل بر ۷۴ عدد چاه مشاهده‌ای، نتایج پژوهش آنها نشان داد با استفاده از الگوریتم اولیه و ثانویه ACO در بهترین جواب حذف ۱۴ و ۲۰ چاه از شبکه پایش اصلی است و از حل الگوریتم تابع دوهدفه، ۱۷ چاه

اضافی از شبکه اصلی پایش شناسایی و حذف شد [۳]. نخعی و همکارانش به منظور بهینه‌سازی و کمینه کردن نقاط نمونه‌برداری در آبخوان دشت هشتگرد از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان استفاده کردند. در این دشت حدود ۳۰ درصد از نقاط اضافی نمونه‌برداری مشخص و حذف شد. نقاط نمونه‌برداری آب برای مطالعات آلودگی ۲۵ عدد است که در نهایت بر اساس نتایج پژوهش یادشده هفت نقطه نمونه‌برداری حذف شد [۴]. هوشنگی و همکارانش تحقیقی با هدف تعیین تعداد بهینه چاه‌های پیرومتری برای تخمین سطح آب‌های زیرزمینی در آبخوان دشت تبریز انجام دادند. بررسی‌های آنها نشان داد برای تخمین سطح آب زیرزمینی در این آبخوان از روش PCA و با فرض اینکه خطای حد آستانه از مقدار ۱۱ درصد بیشتر نشود، ۳۰ چاه حذف می‌شود [۵]. گنجی خرم‌دل و کیخایی آبخوان آستانه-کوچصفهان را برای بهینه‌سازی شبکه، مقایسه و ارزیابی توانایی الگوریتم ژنتیک ترکیب‌شده با کریجینگ و الگوریتم (PSO)، انتخاب کردند. با این شرط که تعداد چاه‌های پایش طوری کاهش یابد که تا حد امکان از کیفیت داده‌ها کاسته نشود. نتایج بهینه‌سازی نشان داد در این آبخوان تعداد چاه‌های مشاهده‌ای می‌تواند به اندازه ۲۶ درصد (۵۷ به ۴۲ چاه)، کاهش داده شود، بدون اینکه فقدان داده‌ای محسوس به وجود آید [۶].

جانسون فیشر، پژوهشی به منظور بهینه‌سازی تراز آب شبکه پایش آب زیرزمینی در دو آبخوان USGS-INL و آبخوان دشت شرقی رودخانه مارآیداهو (ESRP) با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک کریجینگ مبنای انجام داد. شبکه اصلی پایش آبخوان ESRP، ۱۶۶ حلقه چاه و آبخوان USGS-INL، ۱۷۱ چاه مشاهده‌ای داشت. هر شبکه پایش در پنج مرحله بهینه‌سازی شد. در این مراحل ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ چاه مشاهده‌ای از شبکه اصلی حذف شد. چاه‌های مشاهده‌ای از مناطق با تراکم زیاد تعداد حذف شدند و این در حالی بود که الگوی مکانی تراز آب حفظ شد [۷]. دار و پتیل تحت شرایط عدم قطعیت شناختی در پیش‌بینی حرکت توده آلودگی، به بهینه‌سازی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی پرداختند. در پژوهش انجام شده برای نمایش تراکم‌های زمانی و مکانی از کریجینگ معمولی فازی و برای طراحی شبکه پایش، از الگوریتم NSGA-II بهره گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده کارآمدی روش مد نظر در طراحی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی بود [۸].

در این مطالعه برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی و ارتقای شبکه‌های پایش سطح آب از چاه‌های مشاهده‌ای تصادفی توزیع‌شده با توجه به پارامترهای چندگانه مانند GWLF و LiRDLH با استفاده از روش‌های زمین‌آماری گرفته شد. روش پیشنهادی موجود در پژوهش، به‌عنوان یک روش کارآمد برای انتخاب مکان چاه‌های مشاهده‌ای انتخاب شد. نتایج پژوهش آنها نشان داد برای نظارت مناسب بر سطح آب زیرزمینی در منطقه مطالعه شده حداقل ۸۲ حلقه چاه لازم است [۱۳]. باشی ازغدی و کراچیان برای بهینه‌سازی محل چاه‌های پایش روشی شامل دو مدل بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه متفاوت، MCS و مدل‌های شبیه‌سازی کیفی و کمی آب زیرزمینی MODFLOW و MT3D و یک SVM احتمالاتی (PSVM) معرفی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد این روش قابلیت زیادی برای طراحی محل چاه‌های پایش کیفی دارد [۱۴]. هدف از پژوهش حاضر، بازطراحی شبکه پایش آب زیرزمینی برای آبخوان کوهدشت است. تفاوت پژوهش حاضر با تحقیقات پیشین در این است که سایر تحقیقات سعی در کاهش یا افزایش تعداد چاه‌ها در این شبکه را داشتند، در صورتی که در اینجا شبکه پایش به‌طور کلی از نو طراحی شده است.

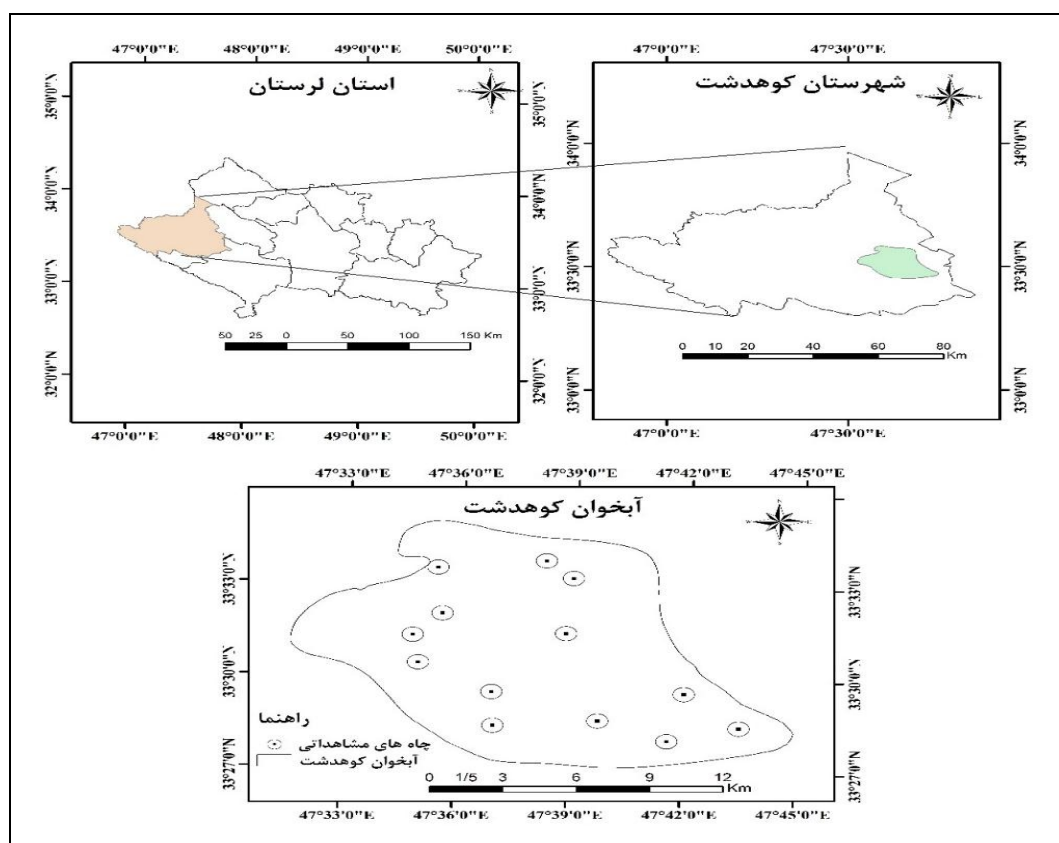
### مواد و روش‌ها

#### منطقه مطالعه شده

منطقه کوهدشت یکی از بخش‌های شهرستان کوهدشت و در استان لرستان قرار دارد و بین طول‌های جغرافیایی ۴۷ درجه و ۵ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۵۵ دقیقه و عرض‌های ۳۳ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۴۰ دقیقه قرار گرفته است و اقلیم نسبتاً گرم و بارش سالانه ۴۴۳/۴ میلی‌متر دارد. این محدوده به لحاظ ارتفاعات آهکی، بارش باران نسبتاً مناسب و آبرفت مناسب، منابع آب زیرزمینی درخور توجه و رودخانه‌های دائمی دارد که از سرشاخه‌های رودخانه کرخه محسوب می‌شوند. محدوده مطالعاتی کوهدشت با وسعت ۱۱۲۹/۳ کیلومتر مربع یکی از محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز کرخه بوده و در غرب استان لرستان واقع شده است. ۳۰/۵۱ کیلومتر مربع از وسعت محدوده را دشت و ۸۲۷/۸ کیلومتر مربع از وسعت آن را ارتفاعات تشکیل می‌دهند. در پژوهش حاضر دشت کوهدشت بررسی شده است. در شکل ۱ منطقه مطالعه شده نمایش داده شده است.

کتابچی و همکارانش برای مدیریت مشکلات آب‌های زیرزمینی ساحلی از الگوریتم‌های تکاملی استفاده کرده‌اند. هشت الگوریتم در تحقیق یادشده استفاده شده است که شامل الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم پیوسته کلونی مورچگان (CACO)، ازدحام ذرات (PSO)، تکامل دیفرانسیلی (DE)، کلونی زنبورهای مصنوعی (ABC)، جست‌وجوی هارمونی (HS)، الگوریتم تکامل مجتمع‌های مخلوط‌شده (SCE)، شبیه‌سازی تبرید یا بازپخت (SA) و سیمپلکس بازپخت شبیه‌سازی‌شده (SIMPSA) هستند. نتایج پژوهش آنها نشان‌دهنده کاربردهای برجسته الگوریتم‌های تکاملی در مدیریت مشکلات آب‌های زیرزمینی و نیز نمایش قوت‌ها و ضعف‌های آنها بودند. از بین الگوریتم‌ها سه الگوریتم SCE، CACO، PSO بهترین راه حل و عملکرد را ارائه دادند و الگوریتم ABC عملکرد ضعیف داشت. از نظر زمان انجام محاسبات، PSO و SIMPSA سریع‌ترین زمان داشتند و SCE، حتی تا چهار برابر نسبت به زمان سریع‌ترین الگوریتم، زمان بیشتری برای انجام محاسبات نیاز داشت [۹]. تاکور شبکه پایش آب‌های زیرزمینی را بر اساس روش آماری و زمین‌آماری بهینه‌سازی مکانی - زمانی کرد. پژوهش ایشان نشان داد شبکه پایش موجود را می‌توان بدون اینکه نگرانی ای برای از دست دادن اطلاعات وجود داشته باشد با استفاده از روش‌های آماری و زمین‌آماری بهینه‌سازی کرد [۱۰]. کیان‌کان لیو پژوهشی به‌منظور توسعه مدل چندهدفه شبیه‌سازی-بهینه‌سازی پایش آب‌های زیرزمینی با در نظر گرفتن چهار هدف انجام داد. مدل بهینه‌سازی PPGA مبنای به‌منظور طراحی شبکه پایش تحت عدم قطعیت توزیع k-field آب‌های زیرزمینی استفاده شد. نتایج پژوهش ایشان نشان‌دهنده توانایی PPGA در ارائه راه حل بهینه پارتو با تنوع کم و ضریب اطمینان زیاد برای یافتن شبکه بهینه پایش آب‌های زیرزمینی است [۱۱].

دیپتی پیوری و همکارانش در پژوهشی شبکه بهینه نظارت بر آلودگی آب‌های زیرزمینی به منظور تشخیص حرکت آلودگی در سیستم‌های آب‌های زیرزمینی را بر اساس توسعه روش‌های الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت و کریجینگ طراحی کردند. نتایج ارزیابی آنها نشان‌دهنده کاربرد مناسب روش‌های توسعه‌یافته در طراحی شبکه پایش بود [۱۲]. کومار سینگ و همکارانش از روش زمین‌آماری برای بهینه‌سازی شبکه چاه‌های مشاهده‌ای ۱۸ زیرحوضه موجود در حوضه وینگانگا واقع در بخش مرکزی هند استفاده کردند.



شکل ۱. منطقه مطالعه شده

## روش تحقیق

به منظور بهینه‌سازی تعداد و پراکنش چاه‌های پیرومتر می‌توان از روش‌های آماری و زمین‌آماری استفاده کرد. در تحقیق حاضر برای طراحی بهینه شبکه پایش آب زیرزمینی از الگوریتم NSGA-II بهره گرفته شده است. الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک الگوریتم محاسباتی بهینه‌سازی با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از نقاط فضای جواب در هر تکرار محاسباتی، به گونه مؤثری نواحی مختلف فضای جواب را جست‌وجو می‌کند. برای انجام تحقیق حاضر ابتدا دشت کوهدشت به‌عنوان منطقه مطالعه شده تعیین و داده‌های مربوط به تراز و سطح آب چاه‌های پیرومتری طی دوره آماری مشخص از اداره آب منطقه‌ای استان لرستان گرفته شد. قبل از انجام هرگونه اقدامی، با استفاده از نرم‌افزار minitab16 داده‌ها تجزیه و تحلیل شده و نرمال و همگن بودن آنها بررسی شد. سپس، برای طراحی کارآمد شبکه پایش و تعیین موقعیت بهینه چاه‌های منطقه مطالعه شده، ابتدا پایگاه داده‌ای از سطح آب زیرزمینی تهیه شد.

## تهیه پایگاه داده

هدف از تشکیل پایگاه داده، تعیین و برآورد اطلاعات سطح آب زیرزمینی در تمامی نقاط آبخوان است. در تحقیق حاضر برای تشکیل پایگاه داده از روش درون‌یابی کریجینگ معمولی بهره گرفته شده است. تخمین‌گر کریجینگ معمولی (OK) متداول‌ترین نوع کریجینگ است که مقدار متغیر در نقطه دلخواه را بر اساس میان‌گیری وزنی خطی مقادیر معلوم در همسایگی آن نقطه برآورد می‌کند [۱۵].

با استفاده از کریجینگ، سطح آب زیرزمینی تمامی نقاط پتانسیل در آبخوان محاسبه شده و در نتیجه سطح آب در همه محدودده به‌صورت گسسته و در نقاط با فاصله‌های مشخص، برآورد می‌شود. بنابراین، هر نقطه پتانسیل یک سری زمانی سطح آب زیرزمینی دارد که بر اساس سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهداتی موجود در منطقه محاسبه شده است. در مسئله طراحی شبکه، این پایگاه داده به‌عنوان مقادیر مشاهداتی سطح آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N \lambda_j(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x_i) \\ \sum_{j=1}^N \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (4)$$

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

که در آن  $\lambda_j$  وزن‌های مربوط به نقاط  $x_j$  و  $\mu$  ضرایب لاگرانژ و  $\gamma(x_i, x_j)$  نیم‌تغییرنمای 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 به صورت رابطه ۵ است:

$$\sigma_k^2(x) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(x_i, x) + \mu \quad (5)$$

که در آن  $\sigma_k^2(x_0)$  واریانس تخمین کریجینگ در نقطه  $x_0$  است [۱۶].

#### استانداردسازی داده‌ها

با توجه به زیاد بودن مقادیر سطح آب زیرزمینی، اصولاً وارد کردن داده‌ها به صورت خام سبب کاهش سرعت و دقت الگوریتم ژنتیک می‌شود. برای نرمالیزه کردن داده‌ها می‌توان از رابطه ۶ استفاده کرد. با استفاده از این روش نرمال‌سازی، سطح آب زیرزمینی دارای مقادیر بین صفر و یک می‌شود. بنابراین، نرمالیزه کردن داده‌ها روشی مناسب برای افزایش میزان کارایی الگوریتم بهینه‌سازی است [۱۶].

$$Z_n = \frac{Z - Z_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \quad (6)$$

در رابطه یادشده  $Z$  داده به صورت خام،  $Z_n$  داده نرمالیزه شده،  $Z_{\min}$  مینیمم داده‌ها و  $Z_{\max}$  ماکزیمم داده‌هاست.

#### الگوریتم ژنتیک

به منظور تعریف الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله طراحی شبکه پایش، تابع هدف و قید مسئله به صورت معادلات ۷-۹ تعریف شده‌اند:

$$\text{Minimize } f_1 = \text{No.Wells} \quad (7)$$

$$\text{Minimize } f_2 = \text{RMSE} \quad (8)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N (Hobs_i^j - Hest_i^j)^2}{TN}} \quad N \leq 30 \quad (9)$$

روش درون‌یابی IDW یکی از روش‌های ساده درون‌یابی فضایی به شمار می‌رود که به‌عنوان نماینده روش‌های قطعی تشریح می‌شود. تخمین IDW در نقاط با مقدار  $\hat{Z}(x_0)$  مجهول با کمک میانگین وزنی همه اندازه‌گیری‌های موجود انجام می‌شود. به‌طور معمول وزن متناسب با معکوس فاصله است، بنابراین نزدیک‌ترین مشاهدات در دسترس، تأثیر بیشتری در تخمین مقدار مجهول دارند. فرمول کلی IDW به صورت رابطه ۱ است:

$$\hat{Z}(x) = \frac{\sum_{j: \|x_j - x\| \leq h} w(x_j) Z(x_j)}{\sum_{j: \|x_j - x\| \leq h} w(x_j)}, \quad w(x_j) = \frac{1}{\|x_j - x\|^p} \quad (1)$$

که در آن،  $\hat{Z}(x_0)$  مقدار مجهول در نقاط  $x_0, x_j$  اندازه‌گیری‌های در دسترس در نقاط  $x_j$  و  $w(x_j)$  وزن‌هایی هستند که با فاصله بین  $x_j$  و  $x_0$  متناسب‌اند. معمولاً، این وزن‌ها به صورت تابع توانی فاصله اقلیدسی بین دو نقطه فضایی انتخاب می‌شوند ( $\|x_j - x_0\|^{-p}$ ). بیوند و همکارانش پیشنهاد دادند که  $p$  برابر با ۲ استفاده شود [۱۶].

#### کریجینگ

یکی از روش‌های اصلی زمین‌آمار کریجینگ، نام دارد. انواع مختلف کریجینگ شامل ساده، معمولی، جهانی، رگرسیون، کوکریجینگ و... می‌شود که (Cressie 1991) به تفصیل آن‌ها را معرفی کرد [۱۷]. فرایند کریجینگ ساده شامل دو بخش اصلی است. بخش نخست ساخت نیم‌تغییرنمای تجربی است (رابطه ۲):

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

که در آن  $\gamma^*(h)$  مقدار تخمینی از نیم‌تغییرنما با تأخیر  $h$  ( $Z(x_i)$  و  $Z(x_i + h)$  مقادیر متغیر به ترتیب در نقاط با موقعیت  $x_i$  و  $x_i + h$  هستند. پس از ایجاد نیم‌تغییرنمای تجربی لازم است یک مدل پارامتری یا غیر پارامتری به آن برازش داده شود و از مدل‌های شاخص می‌توان به‌کرووی، نمایی و خطی اشاره کرد.

در گام بعدی، وزن‌های  $\lambda_j$  مربوط به درون‌یابی در روند حل کریجینگ توسط روابط ۳ و ۴ محاسبه می‌شوند.

$$\hat{Z}(x) = \sum_{j=1}^j \lambda_j Z(x_j) \quad (3)$$

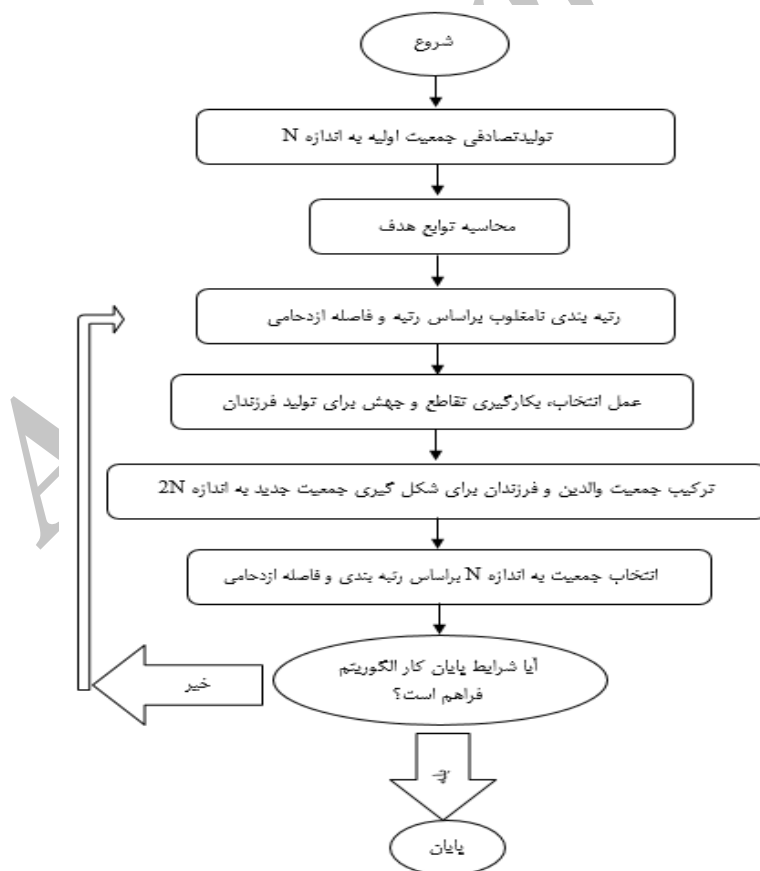
(NSGA) همراه است. در این روش، هر یک از پاسخ‌های مسئله بر اساس اینکه چند پاسخ بهتر از آن وجود داشته باشد، رتبه‌بندی و دسته‌بندی می‌شوند. بنابراین، پاسخی از مسئله که هیچ پاسخی دیگر به‌طور قطع بهتر از آن نباشد، بیشترین امتیاز یا رتبه را خواهد داشت. به این منظور، از روش پارتو استفاده می‌شود. پارتو فرانت روش مرتب‌سازی نامغلوب را نخستین بار در زمینه اقتصاد و در کاربرد بورس مطرح کرد [۱۹]. در روش پارتو وضعیت نسبت به قبل بهتر خواهد بود که بتواند حداقل موقعیت یک مورد را بهبود بخشد، بدون اینکه در موقعیت دیگر اعضا اختلال ایجاد کند.

به‌طور کلی، در یک بهینه‌یابی چندهدفه، تعدادی تابع هدف مختلف هستند که تمایل به یافتن کمینه یا بیشینه آن‌ها به‌طور هم‌زمان در طراحی مد نظر وجود دارد. اغلب این توابع هدف، در نقطه مقابل یکدیگر قرار دارند، به‌طوری که بهبود یکی از آنها، موجب بدتر شدن دیگری

که در آن  $f_1$  تابع هدف اول (تعداد چاه)،  $f_2$  تابع هدف دوم  $RMSE$ ،  $Hobs'_i$  سطح آب زیرزمینی مشاهداتی در نقطه  $i$  و در پایان دوره زمانی  $t$ ،  $Hobs'_i$  سطح آب زیرزمینی محاسباتی در نقطه  $i$  و در پایان دوره زمانی  $t$ ، تعداد کل دوره‌های زمانی،  $N$  تعداد کل نقاط پتانسیل محدوده است.

### الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II)

یکی از الگوریتم‌های اکتشافی حل مسئله، الگوریتم ژنتیک است. این الگوریتم از مدل‌سازی زیستی جمعیت جانداران به وجود آمده است. در این الگوریتم، خصوصیات نسل جانداران به مقدار توابع هدف و بهبود در خصوصیات نسلی در پی گذشت زمان تشبیه و ظهور نسل‌های جدید از آمیزش نسل‌های قبلی به بهبود در مقدار توابع هدف مانند شده است [۱۸]. در شکل ۲ چگونگی انجام الگوریتم (NSGA-II) به‌صورت شماتیک نشان داده شده است. به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب



شکل ۲. چگونگی کار الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II) (امین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵)

جبهه پارتو نشان دهنده فاصله متوسط نزدیکترین نقاط بهینه روی جبهه پارتو نسبت به یک نقطه روی جبهه پارتو است و با استفاده از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود. طرح فاصله تراکمی در حالت دوهدفه در شکل ۴ نشان داده شده است [۱۹].

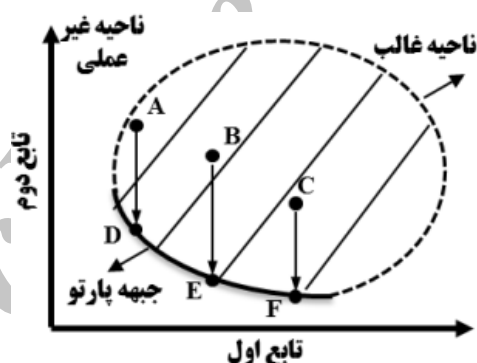
$$d_j(k) = \sum_{i=1}^n \frac{f_i(k+1) - f_i(k-1)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \quad (10)$$

#### شبیه‌سازی

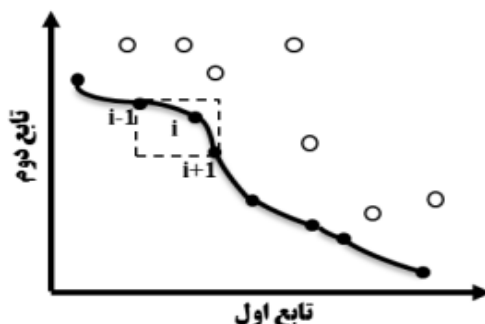
یکی از بخش‌های مهم در مسئله بهینه‌سازی، بخشی است که به بررسی قیود و محاسبه توابع هدف می‌پردازد. در شبیه‌سازی مسئله، ابتدا به کمک یک روش درون‌یابی ساده، قابل اعتماد، قابل کدگذاری و سریع مقادیر محاسباتی سطح آب زیرزمینی در تمامی نقاط پتانسیل به دست می‌آید. سپس، RMSE شبکه با استفاده از مقادیر محاسباتی به دست آمده از درون‌یابی و مقادیر مشاهداتی نقاط پتانسیل موجود در پایگاه داده تعیین و به‌عنوان تابع هدف اول معرفی می‌شود. از طرفی، تعداد چاه‌های شبکه نیز مشخص و به‌عنوان تابع هدف دوم مسئله تعریف می‌شود.

می‌شود. بنابراین، در این‌گونه مسائل به خلاف مسائل تک‌هدفی که فقط یک نقطه اکسترمم برای مسئله وجود دارد، مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه به‌عنوان جواب به دست می‌آیند که به اصطلاح نقاط بهینه پارتو یا منحنی پارتو خوانده می‌شوند.

به بیان دیگر، در این روش یک معیار شایستگی (برازندگی) به هر پاسخ مسئله اختصاص داده می‌شود. همچنین، از شیوه اشتراک برازندگی (Sharing Fitness) که نشان دهنده تکرار ژن‌های غالب در جبهه پارتو است، برای پاسخ‌های مربوط به یک همسایگی استفاده می‌شود. این کار موجب می‌شود که پاسخ‌ها به گونه‌ای مطلوب و به صورت یکنواخت در فضای جست‌وجو (جمعیت اولیه) از محیط مسئله پراکنده یا توزیع شوند. در سال‌های اخیر به‌منظور برطرف کردن معایب روش بهینه‌سازی NSGA از نسخه ارتقا یافته NSGA-II استفاده شده است. در شکل ۳ جبهه پارتوی دوهدفه یا دوبعدی نشان داده می‌شود [۱۹]. معیار فاصله تراکمی در NSGA-II جایگزین اشتراک برازندگی در NSGA شده است. فاصله تراکمی نقاط روی



شکل ۳. جبهه پارتوی دوهدفه یا دوبعدی (کرمی و همکاران، ۱۳۹۴)



شکل ۴. نمایش فاصله تراکمی در جبهه پارتوی دوبعدی (کرمی و همکاران، ۱۳۹۴)

از الگوریتم ژنتیک NSGAI استفاده شد. این برنامه با اندازه جمعیت ۱۰۰، درصد ترویج ۰/۷، درصد جهش ۰/۲ و تعداد تکرار ۳۰ اجرا شده است. در تابع هدف این الگوریتم، قید محدودیت به این صورت تعریف شد که تعداد چاه‌ها از ۳۰ حلقه تجاوز نکند.

بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک NSGAI به صورت سناریوی زیر انجام می‌شود. برای اطمینان از صحت اجرای سناریوی مد نظر، سه اجرای مجزا از الگوریتم بهینه‌سازی صورت گرفت. نتایج اجرای سناریو به صورت زیر توضیح داده می‌شود:

در این سناریو موقعیت چاه‌های قبلی نادیده گرفته می‌شود و جدا از اینکه موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای موجود در منطقه به چه صورت است، شبکه پایش سطح آب زیرزمینی از نو طراحی می‌شود. در نهایت، بهترین موقعیتی که برای قرارگیری چاه در بین نقاط پتانسیل وجود دارد، مشخص می‌شود. نتایج هر سناریو در غالب جبهه پارتو نمایش داده می‌شود. در واقع، مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه به عنوان جواب به دست آمده می‌آیند که به اصطلاح نقاط بهینه پارتو یا منحنی پارتو خوانده می‌شوند.

برای اطمینان دقت اجرای الگوریتم، برای هر سناریو سه بار اجرا شد. جبهه پارتوی مربوط به هر اجرا پیش‌تر نشان داده شده است. در شکل‌های ۶ تا ۸ مقادیر محاسباتی هر دو تابع هدف نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل‌ها نشان داده شده است، با افزایش تعداد چاه انتخابی در الگوریتم میزان میانگین مربعات خطا کاهش می‌یابد. در واقع، شکل نشان می‌دهد چه مقدار RMSE برای هر تعداد چاه ممکن وجود دارد.

بازطراحی شبکه پایش: هدف از اجرای این سناریو، یافتن بهترین موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای در تمامی گستره آبخوان است. در این سناریو فارغ از اینکه موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای موجود در منطقه به چه صورت است، شبکه پایش سطح آب زیرزمینی از نو طراحی می‌شود. در واقع، در این حالت برای اجرای الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، اندازه جمعیت برابر تعداد کل چاه‌های مشاهده‌ای برابر ۱۲۸ چاه در نظر گرفته شد.

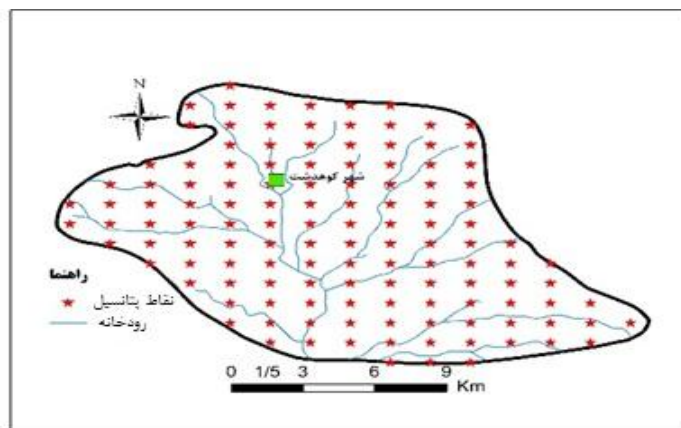
### دوره مدل‌سازی

در منطقه مطالعاتی ۱۵ چاه موجود است، از بین ۱۵ چاه مشاهده‌ای موجود، ۱۳ چاه آمار کامل داشت و دو چاه دیگر به علت نقص و در دسترس نبودن اطلاعات، در پژوهش استفاده نشدند. در تحقیق حاضر آمار سال‌های ۱۳۹۱-۱۳۹۲ تا ۱۳۹۳-۱۳۹۴ به مدت سه سال آماری بررسی شدند. این سری زمانی شامل ۳۶ ماه داده است.

برای استفاده از داده‌ها بعد از بررسی‌های اولیه، مقادیر سطح آب زیرزمینی ماه‌به‌ماه درون‌یابی شدند و پایگاه داده تشکیل شد. سپس، در تمامی سطح محدوده مطالعاتی نقاط پتانسیلی که قابلیت احداث چاه را دارند تعیین شد، بنابراین کلیه نقاط پتانسیل برای تمامی ماه‌ها مقدار داشتند. ۱۲۸ نقطه پتانسیل در سطح محدوده مطالعاتی تعیین شد که به صورت منظم و با فاصله مشخص از یکدیگر قرار گرفته‌اند (شکل ۵). به این ترتیب، پایگاه داده سطح آب زیرزمینی به صورت یک ماتریس با ۱۲۸ سطر (نقاط پتانسیل) و ۳۶ ستون (ماه) آماده‌سازی شد.

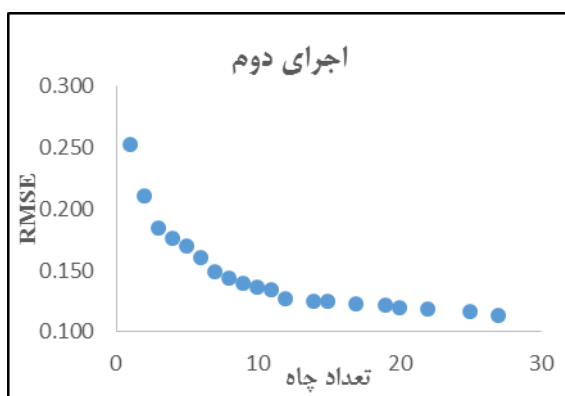
### بحث و نتایج

به منظور بهینه‌سازی تعداد و پراکنش چاه‌های مشاهده‌ای،

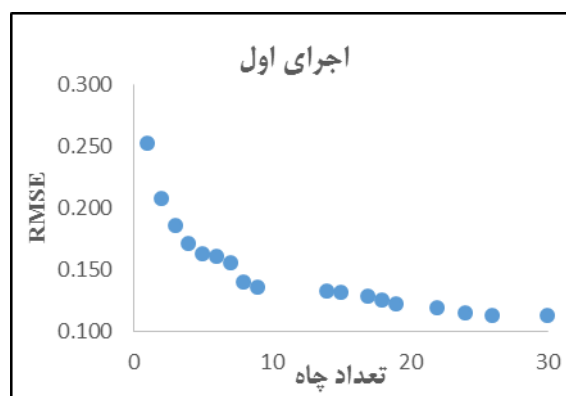


شکل ۵. نقاط پتانسیل در محدوده مطالعاتی

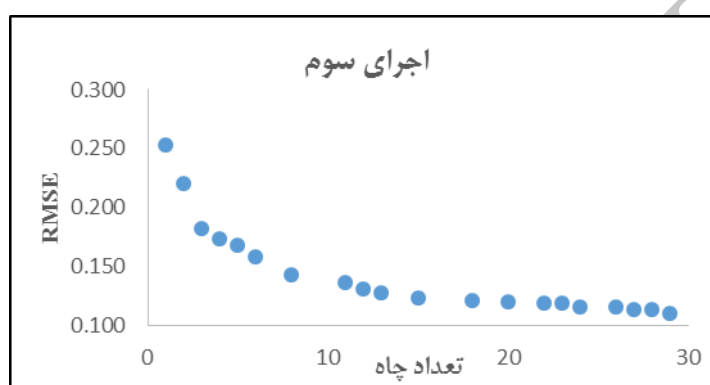




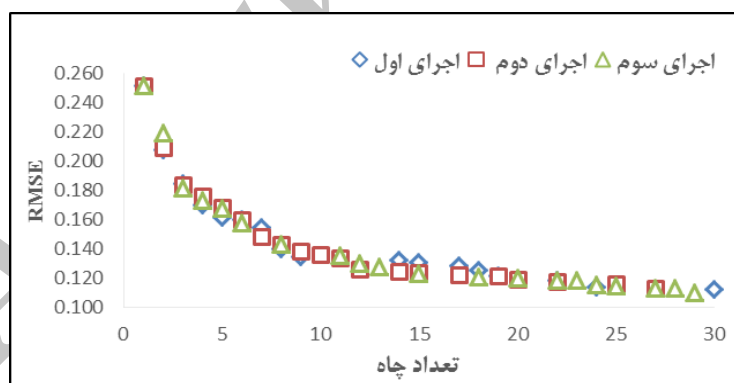
شکل ۷. جبهه پارتوی اجرای دوم



شکل ۶. جبهه پارتوی اجرای اول



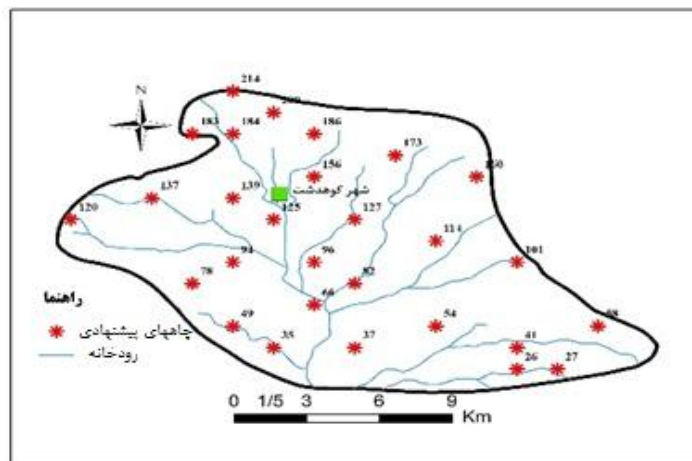
شکل ۸. جبهه پارتوی اجرای سوم



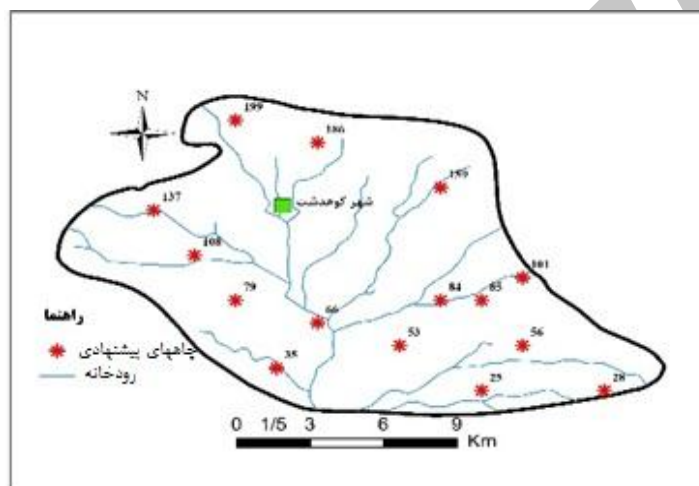
شکل ۹. مقایسه جبهه پارتوی سه اجرای سناریوی اول

به دست آمده از بین نقاط پتانسیلی که از قبل در نظر گرفته شده بود، انتخاب می‌شوند. بنابراین، موقعیت و جانمایی چاه‌ها از طریق نتیجه‌ای که از الگوریتم به دست می‌آید، تعیین می‌شود. نتایج به دست آمده از الگوریتم تعیین می‌کند که در کدام نقطه چاه باشد و در کدام نقطه چاه نباشد. در شکل ۱۰ چاه‌های پیشنهادی به دست آمده از الگوریتم ژنتیک روی نقشه نشان داده شده است.

در شکل ۹ برای راحت‌تر شدن مقایسه بین شکل‌های ۶ تا ۸، هر سه آنها در غالب یک شکل نشان داده شده‌اند. مقدار اندکی تفاوت در ظاهر شکل‌ها وجود دارد، ولی در کل می‌توان گفت که نتایج به دست آمده بسیار به هم نزدیک هستند که نشان‌دهنده دقت مناسب الگوریتم است. نتایج الگوریتم نشان داد تعداد ۲۸ چاه بهترین RMSE یعنی ۰/۱۱ و بهترین پراکنش را دارند. چاه‌های



شکل ۱۰. چاه‌های پیشنهادی به‌دست آمده از سناریوی نخست



شکل ۱۱. پانزده چاه پیشنهادی به‌دست آمده از سناریوی نخست

برای مثال اطلاعاتی که با دو یا سه حلقه چاه به دست می‌آید، بسیار کم و ناکافی است و به همین علت میزان خطا افزایش می‌یابد.

### نتیجه‌گیری

دشت کوهدهشت یکی از محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبخیز کرخه بوده و در غرب استان لرستان واقع شده است. این دشت از نظر آب‌های زیرزمینی بسیار حائز اهمیت است. تغییرات تدریجی کمیت و کیفیت منابع آب را نمی‌توان با نمونه‌برداری‌های نامنظم و پراکنده شناسایی کرد و به شبکه‌های برداشت پیوسته و پردازش داده‌های مربوط به آنها نیاز است. در پروژه حاضر استفاده از روش بهینه‌سازی فوق ابتکاری الگوریتم ژنتیک NSGA-II در طراحی شبکه بهینه‌پایش سطح آب زیرزمینی بررسی شد. هدف از انجام

نتیجه اجرای سناریو با ۱۵ حلقه چاه نیز در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. برای نشان دادن اینکه با کاهش تعداد چاه پراکنش نامناسب و RMSE نیز افزایش می‌یابد، نتیجه به‌دست آمده از الگوریتم با ۱۵ چاه انتخابی نیز نشان داده شده است. در بهینه‌یابی با تعداد ۱۵ حلقه چاه انتخابی میانگین مربعات خطا  $0/13$  به دست آمد. که این مقدار بیشتر از RMSE به‌دست آمده برای ۲۸ چاه بود. در این سناریو، الگوریتم از بین نقاط پتانسیلی که قابلیت ایجاد چاه‌های مشاهده‌ای در سطح دشت را داشتند، بهینه‌سازی را انجام داد. تا زمانی که تعداد چاه اندک است (برای مثال ۲ یا ۳ است)، RMSE بالاست و با افزایش تعداد چاه، مقدار RMSE کاهش می‌یابد. هرچه تعداد چاه‌ها بیشتر باشد، می‌توان آمار و اطلاعات بیشتری از سطح آب و به‌طور کلی وضعیت آب منطقه دریافت کرد،

- Spatial-Temporal Modeling. Iran Water Resources Research. 2016;12(1), 144-133. [Persian]
- [2]. Forughi F, Rezaei M. Optimization of Groundwater Monitoring Network in Tabriz Plain using Geostatistics Method. Quarterly Journal of Environmental Geology. 2012;7(22), 93-103. [Persian]
- [3]. Ahmadvand M. Optimal design of the long-term groundwater monitoring system in the Hamedan-Bahar plain using an ant colony and a robust optimization. Master's Thesis, Islamic Azad University, Tehran-North Branch, Faculty of Science. 2013; 1-17. [Persian]
- [4]. Nakhai M, Amiri V, Ahadi Dolatsara A. Optimization of groundwater monitoring network using ant colony algorithm. 2015; Vol 9, No.4, 174-171. [Persian]
- [5]. Hushangi N, Ale sheikh A, Nadiri A. Optimization of the number of piezometers in predicting groundwater level using PCA and geostatistical methods. Journal of Water and Soil Science. 2015; Vol 25, No. 4.2, 66-53. [Persian]
- [6]. Ganji Khoram del N, Keikhaei F. Optimal design of observation wells in an groundwater level monitoring network using an genetic algorithm. Watershed management research. 2015; 7(14), 159-166. [Persian]
- [7]. Jason C. Fisher, Optimization of Water-Level Monitoring Networks in the Eastern Snake River Plain Aquifer Using a Kriging-Based Genetic Algorithm Method. Prepared in cooperation with the Bureau of Reclamation and U.S. Department of Energy, 2013.
- [8]. Dhar, A. and Patil, R.S., "Multiobjective design of groundwater monitoring network under epistemic uncertainty", Water Resources Management, 2012; 26(7), 1809- 1825.
- [9]. Ketabchi H, Ataie-Ashtiani B. Evolutionary algorithms for the optimal management of coastal groundwater: A comparative study toward future challenges. Journal of Hydrology, 2015; 193-213.
- [10]. Thakur J. Optimizing Groundwater Monitoring Networks Using Integrated Statistical and Geostatistical Approaches. Hydrology. 2015; 2, 148-175.
- [11]. Q. Luo, J. Wu, Y. Yang, J. Qian and J. Wu, "Multi-objective optimization of long-term groundwater monitoring network design using a probabilistic Pareto genetic algorithm under uncertainty. Journal of Hydrology. 2016; 534,, 352-363.

بهینه‌سازی، تعیین یک ترکیب بهینه از میان شبکه اصلی چاه‌های مشاهده‌ای بود، به طوری که امکان کمترین خطای اندازه‌گیری و کمترین فقدان داده و بهترین پراکنش چاه‌ها فراهم شود. در دشت کوهدشت تعداد ۱۵ حلقه چاه مشاهداتی موجود است که از این تعداد، ۱۳ حلقه چاه دارای داده هستند. با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی شبکه پایش آب زیرزمینی از نو طراحی شد و انتخاب چاه‌های مد نظر از بین نقاط پتانسیل صورت گرفت. در نهایت، نتیجه مطلوب و بهینه مد نظر از بین نتایج به دست آمده از ۳۰ تکرار در الگوریتم ژنتیک انتخاب شد و از سناریوی موجود تعداد ۲۸ حلقه چاه که کمترین RMSE یعنی ۰/۱۱۳ و بهترین پراکنش را داشت، به عنوان شبکه پایش آب زیرزمینی آبخوان کوهدشت در نظر گرفته شدند.

نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد الگوریتم ژنتیک NSGA-II در طراحی شبکه بهینه پایش سطح آب زیرزمینی کارایی لازم را دارد و می‌توان در طراحی شبکه پایش از آن استفاده کرد. نتایج به دست آمده با نتایج تحقیقات صورت گرفته (استفاده از الگوریتم ژنتیک) توسط سایر محققان از جمله میرزایی ندوشن (برنامه‌ریزی چندهدفه شبکه پایش آب زیرزمینی) و گنجی خرم‌دل و همکارانش (طراحی بهینه چاه‌های مشاهده‌ای در یک شبکه پایش سطح آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم فوق ابتکاری ژنتیک) مطابقت دارد، ولی تفاوت این مطالعه با سایر پژوهش‌ها در این است که در اینجا بازطراحی شبکه پایش صورت گرفته است.

بهینه‌سازی شبکه پایش آب زیرزمینی را از طریق سه رویکرد هیدروژئولوژیک، آماری و داده‌کاوی می‌توان انجام داد. پیشنهاد می‌شود از رویکرد داده‌کاوی نیز برای بهینه‌سازی شبکه پایش دشت کوهدشت استفاده شود. همچنین، در مطالعه حاضر به دلیل از روش IDW برای درون‌یابی کردن در شبیه‌سازی استفاده شد. می‌توان از روش‌های دیگر نیز بهره برد و آنها را با هم مقایسه کرد تا مشخص شود آیا تغییر روش درون‌یابی تغییری در جواب ارائه شده ایجاد می‌کند یا خیر.

#### منابع

- [1]. Akbarzadeh M, Ghahraman B, Davari K. Optimization of Groundwater Quality Monitoring Network of Mashhad Aquifer Using

- [12]. Deepthi P, Kyna B, Vance C. Karthikeyan R, Optimization of a Water Quality Using a Spatially Referenced Water Quality Model and a Genetic Algorithm Monitoring Network” Journal of Water, 2017; 3-11.
- [13]. Kumar Singh K, Bhaskar Katpata Y. Optimization of Groundwater Level Monitoring Network Using GIS-based Geostatistical Method and Multi-parameter Analysis: A Case Study in Wainganga Sub-basin, India, Chin. Geogra. Sci. 2017; 27 (2), 201–215.
- [14]. Bashi-Azghadi, N. and Kerachian, R., Locating monitoring wells in groundwater systems using embedded optimization and simulation models, Science of the Total Environment, 2010; 408(10), 2189-2198
- [15]. Pudineh O, Daliri M. Compare some geostatistical interpolation methods and meet certain depth to groundwater (Case study: Iranshahr-Bampour plain), Journal of Water Resources Engineering. 2017; 10, 82-100.
- [16]. Mirzaei Nadushan F, Bozorg Hadad A, Khayat Kholghi M. Two Objective design of groundwater level monitoring network using NSGA-II in Eshtehard Plain. Iran Water Researches. 2016; 74(2), 345-354. [Persian]
- [17]. Cressie, N.A.C., Statistics for spatial data, John Wiley & Sons; 1991.
- [18]. AminZadeh Ghoharrizi B, Tohidi rad S, Asadi R. Application of NSGA-II algorithm for solving multi-objective location problems. Quarterly Journal of Urban Studies. 2016; 19, 15-25. [Persian]
- [19]. Karami M, Habibi S, Zhaleh B. Nanocomposite Electromagnetic Absorber Design with Localized Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm Optimization Method. Magazine Research Systems. Nanosciences and Metamaterials from Simulation to Industry. 2015; 93-105. [Persian]

Archive of SID