دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه اصلاح گیاهان زراعی

طراحی بهینه چاه‌های مشاهده‌ای در یک شبکه پایش سطح آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم فوق ابتکاری ژنتیک

ناصر گنجی خرمدل[۱] و فاطمه کیخایی[۲]

۱- استادیار، دانشگاه اراک، (نویسنده مسوول: naser.ganjikhorramdel@gmail.com)
۲- کارشناس ارشد، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اراک
تاریخ دریافت: ۹۲/۹/۱۰ تاریخ پذیرش: ۹۴/۳/۲۳

چکیده

به‌منظور مدیریت کارا و موثر منابع آب زیرزمینی، برای کاهش حفر چاه‌های نمونه‌برداری که پر هزینه هستند، شبکه‌های پایشیکه به طور مناسبی طراحی شده باشند، می‌توانند به عنوان یک گزینه در نظر گرفته شوند. با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی عددی، معضل به دست آوردن اطلاعات کمی و کیفی با حداقل تعداد چاه‌ها و نقاط نمونه‌برداری را می‌توان مرتفع نمود. برای پایش یک سیستم آبخوان، حفر یک شبکه از چاه‌های پایش نیاز است که این امر پرهزینه و پیچیده می‌باشد. در سال‌های اخیر طراحی این شبکه به‌طوری که کارآمد و در عین حال کم هزینه باشد به یک چالش تبدیل شده است. به‌منظور کاهش هزینه، سیستم‌های پایشی مورد توجه‌اند که در شرایط حداقل تعداد نقاط نمونه‌برداری، حداکثر دسترسی به داده‌های مناسب را داشته باشند. تکنیک‌های بهینه‌سازی فوق ابتکاری در این زمینه پتانسیل کاربرد بالایی را دارا هستند. در این مقاله منطقه‌ای از شمال ایران انتخاب شده تا توانایی الگوریتم ژنتیک (GA) ترکیب شده با کریجینگ و الگوریتم اجزای جمعی (PSO)، جهت بهینه‌سازی شبکه مقایسه و ارزیابی گردند، با این شرط که تعداد چاه‌های پایش طوری کاهش یابدکه تا حد امکان از کیفیت 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. مقادیر جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای شبکه بهینه‌سازی به روش GA و PSO به‌ترتیب برابر ۰/۲۰۲۵ و۰/۳۲۲۲ متر محاسبه شد. مقایسه مقادیر RMSE روش GA جهت بهینه‌سازی نهایی توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، الگوریتم اجزای جمعی، آب زیرزمینی، بهینه‌سازی، شبکه پایش سطح ایستابی، دشت آستانه-کوچصفهان

مقدمه

به‌طور کلی پایش و رفتارسنجی پدیده‌ها، مبنای اصولی برنامه‌ریزی، طراحی و بهره‌برداری سامانه‌های مختلف توسعه می‌باشد. با توجه به پیچیدگی‌های محیط آب زیرزمینی و هزینه‌های قابل توجه روش‌های مرسوم پایش، ابداع فن‌آوری‌های نو و بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته در این امر کمک شایانی در بهبود سامانه‌های آب زیرزمینی خواهد نمود. یکی از پارامترهایی که در پایش کمی آب زیرزمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، سطح ایستابی می‌باشد. لذا باید این پارامتر را تا حد امکان با دقت بالایی اندازه‌گیری کرد یا تخمین زد. قابل ذکر است که روش‌های معمول میان‌یابی مورد استفاده، با توجه به عدم کفایت آمار و اطلاعات موجود و همچنین وجود خطا در این روش‌ها، برآورد صحیحی از سطح ایستابی در یک شبکه که تعداد و موقعیت نقاط پایش بهینه نیست، حاصل نمی‌نمایند. اکثر روش‌های بهینه‌یابی معمول، نیازمند فرایندهای تکراری هستند و در یک مسأله ترکیبی غیرخطی، قادر به اعمال جستجوی بهینه سراسری و آنالیز حساسیت تحت قیودات مختلف نمی‌باشند. بهینه‌سازی شبکه پایش آب زیرزمینی را می‌توان به وسیله روش‌های متنوعی انجام داد. اغلب روش‌های قابل ذکر برای طراحی شبکه پایش (به منظور انجام اندازه‌گیری) بر اساس روش‌های واریانسی می‌باشند (۳،۱۰،۱۱،۱۲). به‌طور معمول بهینه‌سازی یک شبکه پایش، یک مسأله ترکیبی غیرخطی می‌باشد، بنابراین می‌توان با روش‌های بهینه‌سازی فوق ابتکاری[۱] با کیفیت بالایی آن را مورد ارزیابی قرار داد. برای مثال روش‌های جستجوی هوشمند و هدایت شده از جمله الگوریتم ژنتیک (GA)[۲] برای حل مسایل پایش استفاده شده‌اند. در زمینه ارزیابی و تکمیل شبکه‌های مشاهده‌ای سطح آب زیرزمینی، تحقیقاتی نیز به‌وسیله بخش منابع آب سازمان زمین‌شناسی کانزاس انجام شده است که می‌توان به دو کاربرد مهم در این زمینه که توسط اولئا و دیویس (۸،۷) در آبخوان کانزاس به انجام رسیده است، اشاره نمود. در بخش اول این تحقیق بعد از این که هر مقدار مشاهده شده، از مجموعه داده حذف شد، برای تخمین مقدار ارتفاع سطح آب در محل چاه مشاهده‌ای، از کریجینگ استفاده کردند. هدف از این کار شناسایی خطاهای اندازه‌گیری سطح آب و یا مکان‌های اشتباه چاه‌های مشاهده‌ای بود. در بخش دوم، به منظور تکمیل شبکه مشاهده‌ای، پیشنهاد نمودند که شبکه را در مناطقی که انحراف استاندارد کریجینگ افزایش عدم قطعیت را نشان می‌دهد، توسعه داده شود. در تحقیقی که به وسیله ی سینیاوسکی و همکاران (۱) انجام پذیرفت، شبکه در ترکیب با روش شبیه‌سازی مونت کارلو[۳] بهینه شد. تعداد هشت الگوریتم به وسیله‌ی لی و الیس (۵) در یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی صحیح (با دو کاربرد) مورد مقایسه قرار گرفته و نتیجه شد که الگوریتم‌های ابتکاری برای حل مسایل طراحی شبکه پایش آب زیرزمینی رضایت‌بخش می‌باشند. در تحقیق دیگری که توسط رید و

1- Meta-heuristic Optimization 2- Genetic Algorithm 3- Monte Carlo Simulation

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-11-20]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1395.7.14.16.8]
[DOI: 10.29252/jwmr.7.14.166]

همکاران (۹) انجام گرفت، یک مدل بهینه‌سازی بر مبنای الگوریتم ژنتیک و یک تخمین‌گر جرم سراسری[1] به منظور جستجو در یک شبکه پایش مورد استفاده قرار گرفتند. روش میان‌یابی مورد استفاده در این تحقیق به منظور تخمین گستره آلاینده براساس کریجینگ معمولی[2] و نیزروش میان‌یابی فاصله معکوس وزنی[3] بود.

کار رید به وسیله وو و همکاران (۱۳) با معرفی قیدهای جدید به همراه مومنت‌های مکانی، برای افزایش دقت تخمین‌های میانیابی بهبود پذیرفت. طراحی بهینه یک شبکه پایش چند متغیره[4] کیفی آب زیرزمینی و شناسایی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی به روش کریجینگ فاکتوریل[5] به همراه الگوریتم ژنتیک به وسیله‌ی یه و همکاران (۱۴) انجام شد. این محققین ضمن تایید این موضوع که کریجینگ امروزه به طور گسترده‌ایدر بسیاری از زمینه‌ها به منظور توزیع و آنالیز تغییرمکانی داده‌های مورد تحقیق، استفاده می‌شود، بیان نمودند که در روش‌های زمین‌آماری چندمتغیره، برای تشخیص تأثیر منابع مختلف بر روی تغییرپذیری مکانی (بر روی تغییرنمای تجربی) باید از کریجینگ فاکتوریل استفاده کرد. در مطالعه‌ای لی و هیلتون (۶) از روش بهینه‌سازی جامعه مورچگان برای حل مسأله بهینه‌سازی طراحی شبکه پایش آب زیرزمینی استفاده نمودند. در این تحقیق نیز ضمن بررسی غلظت یک آلاینده در شبکه پایش کیفی، تنها به بهینه‌سازی مکانی شبکه اکتفا شده و راهکاری برای شناسایی مناطق مستعد حذف و یا تراکم بیشتر ارائه نشده است. در مطالعه‌ای که توسط گنجی خرم دل (۲) انجام شد، یک الگوریتم بهینه‌سازی گسسته اجزای‌جمعی (PSO) که از نوع الگوریتم‌های فوق ابتکاری جدید و هوشمند می‌باشد، در شبکه پایش دشت آستانه-کوچصفهان استان گیلان که شامل ۵۷ چاه مشاهده‌ای می‌باشد، به کار برده شد. در بخش اولاین تحقیق، علاوه بر توزیع مکانی نقاط اندازه‌گیری، تواتر زمانی اندازه‌گیری‌ها نیز در انتخاب مکان نقاط پایش مورد بررسی قرار گرفت. در روش پیشنهادی به منظور تشریح میزان پتانسیل بهبود کیفیت شبکه مشاهده‌ای، سه آنالیز آماری شامل تخمین خطای میانیابی (نشان‌دهنده مناطقی از آبخوان که نیازمند تراکم بیش‌تر بودند)، ارزیابی متقابل (مبین مناطقی از آبخوان که مستعد تنک شدن بودند) و همچنین تغییرات زمانی داده‌های در دسترس بر روی آبخوان آستانه-کوچصفهان به کار برده شد. در این بخش نتیجه گردید که می‌توان پنج چاه را از شبکه پایش حذف نموده و در پنج نقطه دیگر نیاز به چاه اضافی می‌باشد. همچنین با توجه به آنالیز تواتر زمانی انجام شده، در هفت چاه مشاهده‌ای، نیازی به اندازه‌گیری ماهانه نبوده و حداقل اندازه‌گیری فصلی نیز کفایت می‌کند. در بخش دوم با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اجزای‌جمعی شبکه پایش، بهینه شد. نتایج نشان داد که الگوریتم بسط یافته در حل این مسأله، مؤثر و کارا بوده و با تعیین حد آستانه ۰/۳ برای خطا، شبکه بهینه با تعداد ۴۵ چاه باقیمانده به دست آمد. لازم به ذکر است که مقدار جذر میانگین مربعات خطا در روش الگوریتم اجزای جمعی برابر ۰/۳۲۲۲ شد و زمان لازم برای پردازش اطلاعات نیز برابر ۷۲ ثانیه به‌دست آمد. به‌علاوه مقایسه خطوط ایزوپیز حالات مختلف، با شبکه اصلی نشان داد که هر دو مجموعه خطوط خیلی به هم شبیه بوده و تنها در حالت ۴۲ چاه باقیمانده در برخی از خطوط تراز، کمی انقطاع دیده می‌شد.

نتایج حاکی از این بود که ۳۰ درصد کاهش در تعداد چاه‌های مشاهده‌ای (در این بخش) معقول و منطقی به نظر می‌رسد. هدف از مدل طراحی شبکه پایش، پیدا کردن نقشه پایش بهینه از میان حالات بی‌شمار است. به‌عنوان مثال اگر در یک شبکه پایش، تعداد ۱۰۰ محل بالقوه برای انتخاب نقاط پایش وجود داشته باشد، تعداد 2^{100} امکان برای طراحی‌ها برای انجام اندازه‌گیری می‌بایست ارزیابیشود. به علاوه قیدهای تابع هدف نیز به منظور تخمین مقادیر نامعلوم شامل فرایندهای میان‌یابی می‌باشند که بار محاسباتی را بیش از اندازه سخت و دشوار می‌نماید. بنابراین برای یک استفاده عملی و امکان‌پذیر لازم است که در یک الگوریتم بهینه‌سازی، تابع هدف فقط برای جزئی از تمام طراحی‌های امکان‌پذیر شبکه، تا قبل از رسیدن به حل بهینه ارزیابی شود. در این تحقیق امکان بهره‌گیری از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در طراحی شبکه بهینه پایش سطح آب زیرزمینی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌منظور نمایش کاربردی بودن روش پیشنهادی، منطقه مطالعاتی آستانه-کوچصفهان انتخاب شد. روش‌های به‌کار رفته قبلی عموماً از نوع آماری و یا زمین‌آماری بوده و تقریباً در تمام موارد برای شبکه کیفی استفاده شده‌اند که محدودیت‌های آن به لحاظ انتخاب محل، کمتر از شبکه پایش کمی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد تحقیق

دشت آستانه-کوچصفهان در استان گیلان و بر روی مخروط افکنه رودخانه سپیدرود تشکیل شده که مساحت آن حدود ۱۱۰۰ کیلومتر مربع است. مرزهای سطحی این دشت، دریای خزر و دلتاهای رودخانه سپیدرود در قسمت شمال، بازشدگی مخروط افکنه سپیدرود به جلگه گیلان در جنوب، دشت لاهیجان-چابکسر در شرق و دشت فومنات در غرب می‌باشد. طول جغرافیایی محدوده از ۱۲′ ۴۰° تا ۰۵′ ۵۰° شرقی و عرض جغرافیایی ۰۷′ ۳۷° تا ۲۵′ ۳۷° شمالی نوسان دارد (۳). شکل ۱ منطقه مورد تحقیق و موقعیت آن را در استان گیلان نشان می‌دهد.

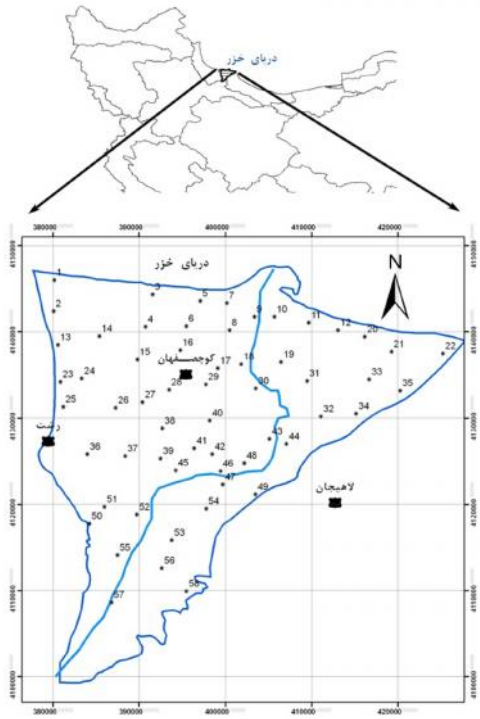
پردازش داده‌ها

داده‌های اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی در دشت آستانه-کوچصفهان در سال آبی۱۳۸۳-۱۳۸۲ (مهر ۸۲ تا شهریور ۸۳) برای پردازش، مورد استفاده قرار گرفت. برای تعیین نیم‌تغییرنما و آنالیزهای مکانی مورد نیاز در آبخوان، از نرم‌افزار SURFER استفاده شد. بررسی نسبت بخش ساختار دار به کل تغییرپذیری نشان داد که تقریباً در همه موارد نقش مؤلفه ساختاردار بیش‌تر از مؤلفه بی‌ساختار است (بیش از ۹۵٪). این سنجه دلالت بر ایده‌آل بودن ساختار مکانی داده‌های سطح ایستابی در محدوده مورد بررسی دارد. بعد از کنترل و آزمایش داده‌ها، روش کریجینگ معمولی با

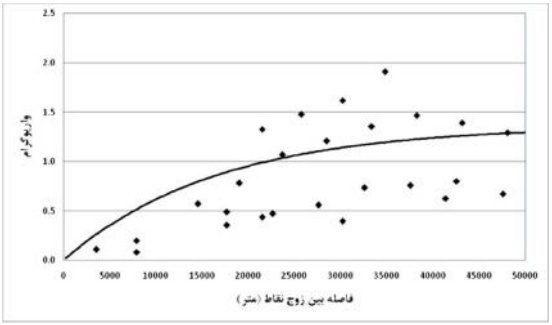
1- Global Mass Estimator
2- Ordinary Kriging
3- Inverse Distance Weighted
4- Multivariate
5- Factorial Kriging

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-11-20]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1395.7.14.16.8]
[DOI: 10.29252/jwmr.7.14.166]

تغییرنمای تئوری نمائی[1] بهترین برازش را نشان داد. در ضمن با بررسی نرمال بودن داده‌های سطح ایستابی در سطح اطمینان ۹۵ معلوم شد که این داده‌ها در حد مطلوبی از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند، بنابراین عبور منحنی نیم تغییرنما، تقریباً از مبدا مختصات دور از انتظار نیست (شکل ۲).



شکل ۱- منطقه مورد تحقیق و موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای
Figure 1. The Case Study and Situation of Observation Wells



شکل ۲- نیم‌تغییرنمای تجربی و تئوری برای آبخوان آستانه-کوچصفهان.
Figure 2. The Empirical and Theory Semi-Variogram for Astane-koochesfahan Aquifer

الگوریتم ژنتیک

به‌منظور تعریف الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله طراحی شبکه پایش، تابع هدف و قید مسأله به صورت معادلات (۱) و (۲) تعریف شدند (۲).

$$MinZ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{WT_{est,i} - WT_{act,i}}{\min(WT_{est,i}, WT_{act,i})}\right)^2}{m}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$m = S_{goal} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در روابط فوق m: تعداد چاه‌های پایش حذف شده (مکان‌های مورد سنجش)، $WT_{act,i}$: سطح ایستابیمشاهداتی چاه حذف شده i، $WT_{est,i}$: سطح ایستابی تخمین زده شده چاه حذف شده، i: بر اساس چاه‌های باقیمانده و S_{goal}: تعداد مطلوب از چاه‌های حذف شده که بر طبق بودجه در دسترس تعیین می‌شود، می‌باشند. هدف این مسأله حداقل نمودن خطاهای تخمینی در هر چاه، مشروط به وجود یک تعداد ثابتی از چاه‌های مشاهده‌ای می‌باشد. تابع Z در واقع همان

1- Exponential

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-11-20]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1395.7.14.16.8]
[DOI: 10.29252/jwmr.7.14.166]

جذر میانگین مربع خطا می‌باشد. گام بعدی برای اجرای الگوریتم ژنتیک، تعیین چگونگی نوشتن مجموعه متغیرهای تصمیم مسأله می‌باشد. در این تحقیق طول رشته، معادل تعداد کل چاه‌های مشاهده‌ای در نظر گرفته می‌شود و از سیستم کد کردن دودویی[1] استفاده می‌شود. مقدار هر ذره (صفر یا یک) مبین وضعیت هر چاه (روشن و خاموش) می‌باشد. به عنوان مثال، رشته ۱۱۱۰۰۰۱۰ مبین این است که چاه‌های ۱، ۲، ۳ و ۷ روشن بوده و چاه‌های ۴، ۵، ۶ و ۸ در وضعیت خاموش می‌باشند. مقدار تابع شایستگی این مسأله به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود.

رابطه (۳)

$$\begin{aligned}&\text{if } m \neq S_{goal}\\&\text{Then}\\&10 \times RMSE \times \left| m - S_{goal} \right|\\&\text{Else } RMSE\end{aligned}$$

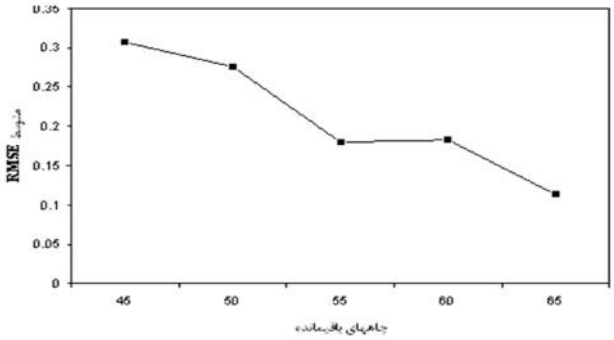
در تابع فوق مقدار RMSE در واقع مقدار تابع هدف در معادله (۱) می‌باشد. میزان جریمه در نظر گرفته شده در این تحقیق برای تابع شایستگی، بر اساس روش جریمه افزایشی[2] بود. در این صورت اگر تعداد چاه‌های حذف شده در الگوریتم ژنتیک، با تعداد مورد انتظار برای حذف از شبکه پایش برابر نباشند، مقدار تابع شایستگی تا ده برابر افزایش داده می‌شود. به عبارت دیگر ضریب جریمه ده در نظر گرفته می‌شود.

بعد از انجام انتخاب و اعمال اپراتورهای تقاطع و جهش، رشته‌های شایسته‌تر از میان جمعیت به‌دست می‌آیند. برای اجرای الگوریتم ژنتیک اندازه جمعیت برابر تعداد چاه‌های مشاهده‌ای موجود (۵۷ چاه) در نظر گرفته شد. الگوی مورد استفاده برای انجام تقاطع، یک نقطه‌ای بوده و احتمال تقاطع ۰/۸۵ در نظر گرفته شد. در این تحقیق با استفاده از یکی از زمین آماری کریجینگ، برای چاه‌ها مقدار تعیین شده و در نهایت مقدار خطا بین مقادیر مشاهداتی سطح ایستابی چاه‌ها و مقادیر حاصل از میان‌یابی (حاصل از روش زمین آمار)، محاسبه شد. سپس از مدل بهینه‌سازی استفاده شد تا لزوم و یا عدم لزوم آن بررسی شود. هدف در مدل بهینه‌سازی، حداقل نمودن فقدان داده‌ای کل[3] در شبکه کاهش یافته می‌باشد. هدف از این کار شناسایی مجموعه بهینه کاهش یافته چاه‌های پایش از شبکه موجود پایش می‌باشد، بنابراین، این امکان به وجود خواهد آمد تا بتوان چاه‌های حذف شده را با یک خطای حداقل، به وسیله مجموعه چاه‌های بهینه شده (کاهش یافته) تخمین زد.

مقدار شایستگی هر طرح پایش، به وسیله تابع هدف که شامل خطای بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و محاسبه شده می‌باشد، بیان خواهد شد. مقادیر شایستگی به وسیله الگوریتم ژنتیک ارزیابی می‌شود تا اینکه در نهایت حل بهینه پیدا شود.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از اجرای الگوریتم ژنتیک در جدول ۱ آورده شده است. نتایج از میان بهترین آن‌ها از ۵۰ تکرار انجام شده، انتخاب شد. نتایج نشان داد که هرچه تعداد بیش‌تری از چاه‌های مشاهده‌ای حذف شود، مقدار RMSE بزرگ‌تر می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳– نمایش تغییرات مقدار متوسط RMSE در مقابل تعداد چاه‌های باقیمانده در شبکه پایش
Figure 3. Variation of Mean RMSE vs Number of Remained Wells in monitoring Network

در جدول ۱، چاه‌های شناسایی شده مستعد حذف از شبکه پایش برای حالات مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود به عنوان نمونه، برای حالت ۵۴ چاه باقیمانده، چاه‌های ۱۵، ۴۴ و ۴۷ منتخب حذف از شبکه پایش شده‌اند. اما در حالت ۵۱ چاه باقیمانده به جای انتخاب سه چاه منتخب در دوره قبل به علاوه سه چاه جدید تنها دو چاه مشترک در بین دو حالت ذکر شده وجود دارد. علت این امر به ماهیت غیرخطی پدیده بر می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌شود، مقدار ریشه میانگین مربعات خطای الگوریتم ژنتیک در حالت ۴۲ چاه باقیمانده برابر ۰/۲۰۲۵ شده است. همانطور که بیان شد در تحقیق گنجی خرم دل (۲) این مقدار برابر ۰/۳۲۲۲ به دست آمد. این موضوع مبین این است که الگوریتم ژنتیک دارای برتری در جستجوی موضعی نزدیک بهینه سراسری بوده و به عبارت دیگر برخی از حل‌های ضعیف نزدیک به بهینه را نیز به‌دست آورده است. شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نقشه خطوط ایزوپیز تخمینی را در مقایسه با خطوط ایزوپیز برای حالات ۵۴، ۴۸ و ۴۲ چاه باقیمانده نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، برخی اختلافات جزئی بین دو خط تراز مذکور دیده می‌شود و تنها در حالت ۴۲ چاه باقیمانده، این انقطاع در خطوط تراز بیش‌تر است. اما در کل

1- Binary 2- Multiplicate Penalty 3- Overall Data Loss

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-11-20]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1395.7.14.16.8]
[DOI: 10.29252/jwmr.7.14.166]

توزیع چاه‌های مستعد حذف که بطور پر رنگ نشان داده شده‌اند، مطابق انتظار بوده است. به منظور ارزیابی کیفیت حل الگوریتم ژنتیک، زمان صرف شده برای پردازش اطلاعات، در مقایسه با روش‌های تکراری معمول بررسی شد. نتایج نشان داد که الگوریتم بسط یافته در این تحقیق در حل مسأله بهینه‌سازی طراحی شبکه پایش موثر و کارا بوده و تنها نیازمند ۲۸۵۰ بار ارزیابی تابع هدف (۲۸۵۰=۵۰×۵۷) می‌باشد. این به‌طور معنی‌داری کمتر از $۲/۲۰۵۷۹۸۱۴۶ \times ۱۰^{۱۳}$ ارزیابی است که در سرشماری کامل برای حل حالت ۴۲ چاهه لازم است. این مطلب در جدول ۲ به وضوح دیده می‌شود. بنابراین نتیجه می‌شود که الگوریتم‌های فوق ابتکاری به‌طور حیرت‌آوری در مقایسه با روش شمارشی کامل از نظر زمان لازم برای حل مسأله، موثر و کارا می‌باشند. نتایج این تحقیق با نتایج لی و هیلتون (۶) و نتایج گنجی خرم دل (۲) مطابقت دارد.

جدول ۱- نتایج حاصل از بهینه‌سازی انجام شده به‌وسیله‌ی الگوریتم ژنتیک

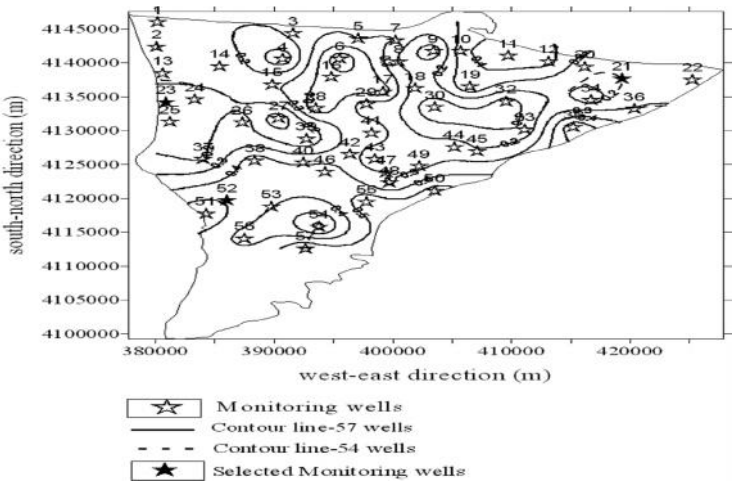
Table 1. The Conclutions of Optimization Performed by Genetic Algorithm

تعداد چاه‌های باقیمانده	چاه‌های حذفی	مقدار RMSE الگوریتم ژنتیک
۵۴	۱۵، ۴۴، ۴۷	۰/۱۰۴۴
۵۱	۵۳، ۴۴، ۳۴، ۲۳، ۲۱، ۱۵	۰/۱۲۲۴
۴۸	۲، ۳، ۱۵، ۲۱، ۳۴، ۴۲، ۴۴، ۴۷، ۵۳	۰/۱۷۷۳
۴۵	۲، ۱۳، ۱۵، ۲۱، ۲۳، ۲۶، ۴۰، ۴۲، ۴۴، ۴۷، ۵۲، ۵۳	۰/۱۶۵۰
۴۲	۱، ۳، ۱۳، ۱۵، ۲۲، ۲۳، ۲۶، ۳۳، ۴۰، ۴۲، ۴۴، ۴۷، ۴۹، ۵۲، ۵۳	۰/۲۰۲۵

جدول ۲- فضای جستجو برای مسأله طراحی شبکه پایش

Table 2. The Search Space for Design of Monitoring Network Problem

تعداد چاه‌های باقیمانده	فضای جستجو
۵۴	$C_{57}^{3} = 29260$
۵۱	$C_{57}^{6} = 36288252$
۴۸	$C_{57}^{9} = 8996462475$
۴۵	$C_{57}^{12} = 7.072855226 \times 10^{11}$
۴۲	$C_{57}^{15} = 2.205798146 \times 10^{13}$



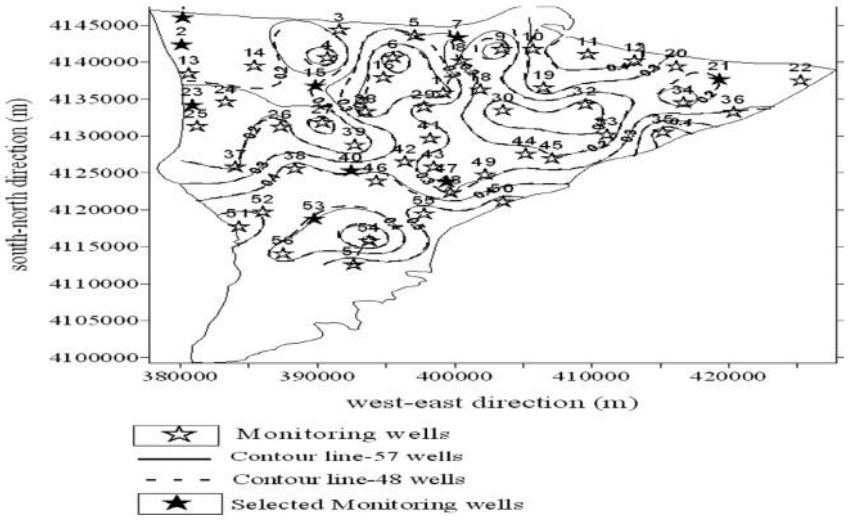
شکل ۴- منحنی‌های تراز سطح ایستابی با حذف سه چاه مشاهده‌ای به‌وسیله‌ی الگوریتم ژنتیک

Figure 4. The Water table Level Curves with Eliminated of 3 Observation Wells by Genetic Algorithm

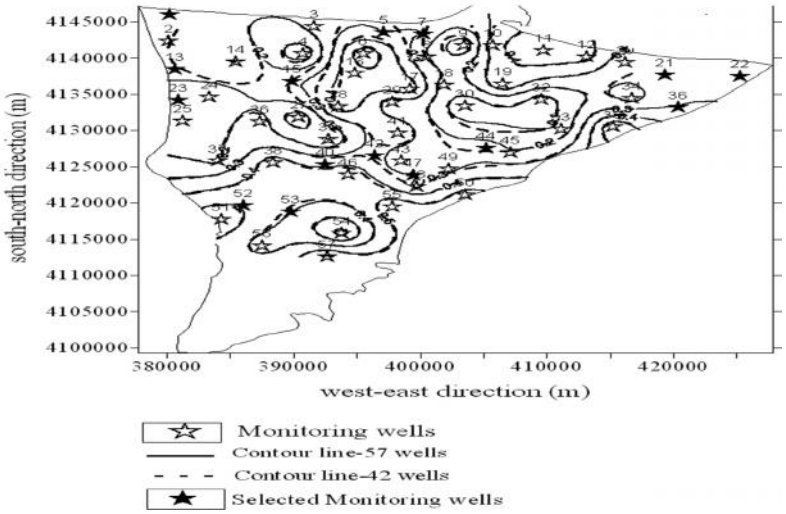
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-11-20]

[DOR: 20.1001.1.22516174.1395.7.14.16.8]

[DOI: 10.29252/jwmr.7.14.166]



شکل ۵- منحنی‌های تراز سطح ایستابی با حذف نه چاه مشاهده‌ای به‌وسیله‌ی الگوریتم ژنتیک
Figure 5. The Water table Level Curves with Eliminated of 9 Observation Wells by Genetic Algorithm



شکل ۶- منحنی‌های تراز سطح ایستابی با حذف ۱۵ چاه مشاهده‌ای به‌وسیله‌ی الگوریتم ژنتیک
Figure 6. The Water table Level Curves with Eliminated of 15 Observation Wells by Genetic Algorithm

همانطور که بیان شد، دو روش معمول برای بهینه‌سازی شبکه پایش، استفاده از بهینه‌سازی ریاضی و نیز همچنین استفاده از آنالیزهای آماری می‌باشد. ابزارهای پشتیبان- تصمیم معمول مورد استفاده همانند MAROS[1] و GTS[2] از فرآیندهای تکراری استفاده می‌نمایند و در ضمن روش‌های آماری مورد استفاده با توجه به عدم کفایت آمار و اطلاعات موجود و همچنین پایین بودن دقت آنها، برآورد صحیحی را حاصل نمی‌نمایند. از طرف دیگر مسایل بهینه‌سازی پایش طولانی مدت، معمولاً ترکیبی و غیرخطی می‌باشند، بنابراین این روش‌ها قادر به جستجوی بهینه سراسری و آنالیز حساسیت تحت قیدهای مختلف نمی‌باشند. در این تحقیق امکان بهره‌گیری از روش بهینه‌سازی فوق ابتکاری الگوریتم ژنتیک در طراحی شبکه بهینه پایش سطح آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت. هدف از انجام بهینه‌سازی، تعیین یک ترکیب بهینه (کاهش یافته) از میان شبکه اصلی چاه‌های مشاهده‌ای بود، به طوری که انتظارات طرح را از نظر میزان فقدان داده‌ای کل برآورده نماید. با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک شبکه پایش، بهینه شد. نتایج نشان داد که الگوریتم بسط یافته در حل این مسأله، موثر و کارا بوده و با تعیین حد آستانه ۰/۲ برای خطا، شبکه بهینه با تعداد ۴۵ چاه باقیمانده به‌دست آمد. به طوریکه مقدار جذر میانگین مربعات خطا برابر ۰/۲۰۲۵ محاسبه شد. لازم به ذکر است که این مقدار در روش الگوریتم اجزای جمعی برابر ۰/۳۲۲۲ شد. در ضمن زمان لازم برای پردازش اطلاعات نیز

1- Monitoring and Remediation Optimization System
2- Geostatistical Temporal/Spatial

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-11-20]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1395.7.14.16.8]
[DOI: 10.29252/jwmr.7.14.166]

برابر ۱۳۶ ثانیه به دست آمد که این مقدار در الگوریتم اجزای جمعی برابر ۷۲ ثانیه بود (۲). به علاوه مقایسه خطوط ایزوپیز حالات مختلف، با شبکه اصلی نشان داد که هر دو مجموعه خطوط خیلی به هم شبیه بوده و تنها در حالت ۴۲ چاه باقیمانده در برخی از خطوط تراز، کمی انقطاع دیده می‌شد. نتایج حاکی از این بود که ۲۶ درصد کاهش در تعداد چاه‌های مشاهده‌ای (در این بخش) معقول و منطقی به نظر می‌رسد.

در این تحقیق ضمن مقایسه خطوط تراز شبکه اصلی و بهینه شده، تعداد ۱۲ چاه از شبکه پایش مستعد حذف از شبکه شدند. مقایسه چاه‌های حذف شده در مراحل مختلف، نشان داد که پایش سطح ایستابی در یک منطقه، از الگوی خطی پیروی نکرده و با استفاده از روش‌های غیرخطی، همانند الگوریتم ژنتیک، می‌توان به نتایج بهتری دست یافت.

منابع

1. Cieniawski, S.E., J.W. Eheart and S. Ranjithan. 1995. Using Genetic Algorithm to Solve a Multi Objective Ground water Monitoring Problem. Water Resources. Research, 31: 399-409.
2. Ganji Khorramdel, N. 2012. Optimizing Groundwater Monitoring Networks Using the Particle Swarm Algorithm. Groundwater Quality sustainability. CRC Press. Chapter, 24: 311-320.
3. Hudak, P.F. and H.A. Loaiciga. 1992. A Location Modeling Approach for Groundwater Monitoring Network Augmentation. Water Resource, 28: 643-649.
4. Khorsandi, A. 2006. Analyzing on Hydro climatology Balance in Astane-Koochesfahan Plain. Gilan Regional Water Institute, 150 pp (In Persian).
5. Lee, Y.M. and J.H. Ellis.1996. Comparison of Algorithms for Nonlinear Integer Optimization: Application to Monitoring Network Design. Journal of Environmental. Engineering, 122: 524-531.
6. Li, Y. and A.B. Chan Hilton. 2006. Reducing Spatial Sampling in Long-Term Ground-Water Monitoring Using Ant Colony Optimization. International Journal of Computational Intelligence Research, 1: 19-28.
7. Olea, R. and J. Davis. 1999a. Optimizing the High Plains Aquifer Water-Level Observation Network, K.G.S. Open File Report, 15 pp.
8. Olea, R. and J. Davis. 1999b. Sampling Analysis and Mapping of Water Levels in the High Plains Aquifer of Kansas, K.G.S. Open File Report, 11 pp.
9. Reed, P.M., B.S. Minsker and A.J. Valocchi. 2000. Cost-Effective Long-Term Groundwater Monitoring Design Usinga Genetic Algorithm and Global Mass Interpolation. Water Resources Research, 36: 3731-3741.
10. Ridley, M.N., V.M. Johnson and R.C. Tuckfield. 1995. Cost-Effective Sampling of Groundwater Monitoring Wells Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA. UCRL-JC-118909. 14 pp.
11. Rouhani, S. 1985. Variance Reduction Analysis. Water Resources Research, 21: 837- 846.
12. Rouhani, S. and T.J. Hall.1988. Geostatistical Schemes for Groundwater Sampling. Journal of Hydrology, 103: 85-120.
13. Wu, J., C. Zheng and C.C. Chien. 2005. Cost-Effective Sampling Network Design for Contaminant Plume Monitoring under General Hydro geological Conditions. Journal of Contaminant Hydrology, 77: 41-65.
14. Yeh, M.S., Y.P. Lin and L.C. Chang. 2006. Designing an Optimal Multivariate Geostatistical Groundwater Quality Monitoring Network Using Factorial Kriging and Genetic Algorithms, Environmental Geology, 50: 101-121.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-11-20]

[DOR: 20.1001.1.22516174.1395.7.14.16.8]

[DOI: 10.29252/jwmr.7.14.166]

Optimal Design of Obsevation Wells in a Groundwater Monitoring Network Using Meta-Heuridtic Genetic Algorithm

Naser Ganji Khorramdel[1] and Fatemeh Keykhaei[2]

1- Assistant Professor, Arak University, (Corresponding author: naser.ganjikhorramdel@gmail.com)
2- M.Sc. Irrigation and Drainage, Agricultural and Natural Resource Research Center of Arak
Received: December 1, 2013 Accepted: June 13, 2015

Abstract

Well designed monitoring networks are essential for the effective management of groundwater resources but the costs of monitoring well installations and sampling can prove prohibitive. The challenge is to obtain adequate water quality and quantity information with a minimum number of wells and sampling points, a task that can be approached objectively and effectively using numerical optimization methods. Unfortunately, aquifer systems tend to be complex and monitoring can be very expensive, particularly when it requires the installation of a dedicated network of monitoring wells. In recent years, the challenge has been to design monitoring networks that are both efficient and cost effective. With regards to groundwater monitoring systems, where the challenge is to maximize the availability of good quality data while minimizing the number of sampling sites and thereby limiting costs, optimization techniques clearly have a potentially valuable application. In this paper we use a site in northern Iran to test the ability of GA, when used in combination with Kriging, in comparison with PSO to lower the cost of a monitoring network by reducing the number of monitoring wells without compromising the quality of the interpolated data. The results of the optimization showed that the number of observation wells in the Astaneh aquifer monitoring network could be reduced by 26% from 57 to 42 without a significant loss of information. The root mean square error (RMSE) for the final optimized network in GA was 0.2025 m, that in PSO 0.3222 m. A comparison of RMSE values determined using the GA algorithm with those calculated using PSO algorithm technique showed good agreement and provides strong support for more efficient GA approach.

Keywords: Astane-Koochesfahan Plain, Genetic Algorithm, Groundwater Monitoring network, Optimization

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-11-20]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1395.7.14.16.8]
[DOI: 10.29252/jwmr.7.14.166]