نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز
جلد ۱۱، شماره ۱، ۱۳۹۸، صفحات ۲۷۳-۲۸۲

Journal of Watershed Engineering and Management
Volume 11, Issue 1, 2019, Pages 273-282
DOI: 10.22092/ijwmse.2019.118434

# گزارش فنی

# بهینه‌سازی و توسعه شبکه پایش سطح آب زیرزمینی در دشت اشتهارد

**فهیمه میرزائی ندوشن[۱]، امید بزرگ‌حداد[۲] و مجید خیاط خلقی[۳]**

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، [۲] دانشیار، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران و [۳] استاد، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۱۱

**چکیده**

نظارت مستمر بر میزان تخلیه از چاه‌ها، میزان تغذیه به چاه‌ها و تغییرات سطح و کیفیت آب زیرزمینی در مدیریت منابع آب زیرزمینی بسیار حائز اهمیت است. شبکه پایش آب زیرزمینی، می‌تواند ارائه‌دهنده اطلاعات مربوط به تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی باشد و از این‌رو می‌توان به پیش‌بینی رفتار آبخوان در آینده پرداخت. طراحی شبکه پایش، یعنی تعیین تعداد چاه‌های مشاهداتی موجود در شبکه پایش و نحوه توزیع و تراکم آن‌ها در منطقه از مسائل قابل تأمل در آب زیرزمینی می‌باشد. در این تحقیق، روشی بر پایه بهینه‌سازی برای طراحی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی ارائه شده و در آبخوان دشت اشتهارد مورد استفاده قرار گرفته است. برای بهینه‌سازی موقعیت چاه‌های مشاهداتی دو سناریوی: ۱) انتخاب چاه‌های بهینه از بین چاه‌های مشاهداتی موجود در منطقه مطالعاتی و ۲) افزودن چاه‌های پایش بهینه به مجموعه چاه‌های مشاهداتی موجود در منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شده است. به‌منظور تهیه بانک اطلاعات مورد نیاز برای شبیه‌سازی وضعیت آبخوان، از درون‌یابی کریجینگ استفاده شده است. بهینه‌سازی دو هدفه شبکه پایش سطح آب زیرزمینی با اهداف کمینه نمودن مقدار ریشه مربعات میانگین خطا (RMSE) و کمینه نمودن تعداد چاه‌ها (معرف کمینه نمودن هدف هزینه احداث، نگهداری و قرائت چاه‌ها) به‌وسیله نسخه دوم الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) اجرا شده است. نتایج نشان داد که به کمک روش پیشنهادی می‌توان در یک شبکه پایش موجود با دقت قابل قبولی تعدادی از چاه‌های مشاهداتی اضافی را حذف کرد یا در صورت کمبود چاه در شبکه موجود، تعدادی چاه به شبکه اضافه نمود.

**واژه‌های کلیدی:** بهینه‌سازی دو هدفه، تغذیه چاه، درون‌یابی، مدیریت منابع آب زیرزمینی، NSGA-II

**مقدمه**

شبکه پایش کمی و کیفی آب زیرزمینی شامل تعدادی چاه مشاهداتی به‌ترتیب برای اندازه‌گیری تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی در آبخوان‌ها به‌صورت دوره‌ای و منظم است. در طراحی این شبکه‌ها عواملی چون گستره آبخوان، وضعیت زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی آبخوان، اهداف ایجاد شبکه و محدودیت‌های مالی مؤثر هستند. هزینه‌های نصب و نگهداری و هزینه‌های مربوط به قرائت سطح آب و اندازه‌گیری‌های کیفیت آب زیرزمینی در چاه-های مشاهداتی متناسب با تعداد چاه‌های موجود در شبکه می‌باشند. برای تعیین برنامه بهره‌برداری از آب-

* مسئول مکاتبات: fhmnodoushan@ut.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

های زیرزمینی برای انواع مصارف و یا ایجاد هر گونه سازه آبی می‌بایست اطلاعات مورد نیاز از شبکه‌های پایش آب زیرزمینی جمع‌آوری، ذخیره، تحلیل و نتیجه‌گیری شوند و در نهایت مدیریت مناسب اعمال شود.

محققان برای طراحی شبکه پایش آب زیرزمینی دو رویکرد، ۱) هیدروژئولوژیکی[۱] و ۲) آماری[۲] را مورد استفاده قرار داده‌اند (Loaiciga و همکاران، ۱۹۹۲). در رویکرد هیدروژئولوژیکی با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی و آب زیرزمینی منطقه، طراحی یک شبکه پایش با اهداف مشخص انجام می‌شود. رویکردهای آماری که شامل روش‌های شبیه‌سازی[۳]، واریانس مبنا[۴]، احتمالاتی مبنا[۵] و بهینه‌سازی[۶] هستند، با توجه به این که اطلاعات در دسترس انسان در مورد خصوصیات آب زیرزمینی و وضعیت زمین‌شناسی منطقه غیرقطعی است، به طراحی می‌پردازند.

Hudak و Loaiciga (۱۹۹۳) یک مدل طراحی شبکه پایش را معرفی نمودند که موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری را تعیین کرد و طراحی بر پایه تحت پوشش قرار دادن آبخوان از نظر خطرپذیری آلودگی تعریف شد. روش پیشنهادی ایشان دو رویکرد هیدروژئولوژیکی و آماری را در بر می‌گرفت. در بخش هیدروژئولوژیکی طراحی، وزنی بسته به فاصله از منبع آلودگی برای هر نقطه پتانسیل در لایه‌های مختلف آبخوان محاسبه شد. سپس با یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی[۷] بهترین آرایش چاه‌ها تعیین شد. نتایج به‌دست آمده از جانمایی چاه‌های مشاهداتی شبکه، دو مشخصه را ارائه می‌داد، ۱) جمع شدن چاه‌ها در اطراف خروجی‌های آلودگی در مرزهای منبع آلودگی و ۲) پوشش مناطق خالی که مستعد ابتلا به آلودگی بودند.

Storck و همکاران (۱۹۹۷) یک روش بر پایه شبیه‌سازی مونت کارلو[۸] (MCS) برای طراحی شبکه پایش چاه‌ها با هدف کشف آلودگی آب زیرزمینی در آبخوان‌ها ارائه دادند. بهینه‌سازی مدل به‌وسیله الگوریتم نورد شبیه‌سازی شده[۹] (SA) با اهداف چندگانه طراحی شامل بیشینه کردن احتمال کشف آلودگی، کمینه نمودن حجم آب زیرزمینی آلوده شده در زمان کشف و کمینه کردن هزینه نمونه‌برداری انجام شد. به‌کارگیری روش پیشنهادی در منطقه‌ای از ایالات متحده آمریکا نشان داد که شبکه چاه‌های موجود در منطقه با در نظر گرفتن توابع هدف مذکور بهینه نیست و بازطراحی شبکه چاه‌ها ضرورت دارد.

Asefa و همکاران (۲۰۰۴) روشی بر پایه ماشین بردار پشتیبان[۱۰] (SVM) برای طراحی شبکه‌های پایش سطح آب زیرزمینی ارائه دادند. آن‌ها یک مدل بهینه‌سازی درجه دوم حل‌پذیر منحصر به فرد[۱۱] را به‌کار بستند تا نه‌تنها خطای مربع متوسط اختلاف‌ها بین مقادیر سطح آب زیرزمینی محاسبه شده و پیش-بینی شده، بلکه محدوده خطرپذیری نیز کمینه شود. مدل بهینه‌سازی، موقعیت‌های چاه‌ها را بر اساس اهمیت آن‌ها در تشریح سطح پتانسیل‌سنج[۱۲] تعیین می‌کرد. از جمله نتایج ایشان در توصیف قابلیت روش پیشنهادی، می‌توان به جای‌گذاری چاه‌های پایش در موقعیت‌های با بیشترین عدم قطعیت سطح آب زیرزمینی اشاره نمود.

Wu (۲۰۰۴) در منطقه‌ای در چین که دارای ۳۴ حلقه چاه مشاهداتی بود، طراحی یک شبکه پایش کارآمد را برای نظارت بر تغییرات کیفی آب زیرزمینی لازم دانست. مدل جریان آب زیرزمینی به‌وسیله یک الگوریتم تخمین بهینه شامل ترکیب دو مدل اجزاء محدود[۱۳] و غربال کالمن[۱۴] واسنجی شد. سپس توزیع مکانی سطح انحراف معیار[۱۵] (SDS) برای چند آرایش شبکه محاسبه شد و ایستگاه‌هایی که بیشترین انحراف معیار را داشتند، به‌عنوان ایستگاه‌های لازم برای افزودن به شبکه انتخاب شدند. بر پایه این روش

[1] Hydrogeologic approach
[2] Statistical approach
[3] Simulation
[4] Variance-based
[5] Probability-based
[6] Optimization
[7] Mathematical programming model
[8] Monte Carlo Simulation

[9] Simulated annealing
[10] Support Vector Machine
[11] Uniquely solvable quadratic optimization model
[12] Potentiometric surface
[13] Finite-element
[14] Kalman filter
[15] Standard Deviation Surface

Archive of SID

www.SID.ir

پیشنهادی، شبکه پایش با ۸۸ حلقه چاه مشاهداتی و ۱۲ بار قرائت در سال برای منطقه برنامه‌ریزی شد.

Li و Hilton (۲۰۰۵) در راستای شناسایی ایستگاه‌های بهینه شبکه پایش از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان[1] (ACO) کمک گرفتند. برای تخمین مقادیر آلودگی در هر نقطه با استفاده از مقادیر محاسبه شده از روش وزن‌دهی فاصله معکوس[2] (IDW) استفاده شد. مسئله بهینه‌سازی برای انتخاب تعداد ۲۱ تا ۲۷ چاه از ۳۰ حلقه چاه مشاهداتی موجود در منطقه مطالعاتی حل شد. نقشه‌های هم-ارزش[3] توده آلودگی چاه‌های منتخب، سودمندی و قابلیت ACO را به‌عنوان ابزار کارآمدی برای حل مسئله بهینه‌سازی پایش آب زیرزمینی نشان داد.

Owlia و همکاران (۲۰۱۱) ارزیابی زمانی-مکانی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی را مد نظر قرار دادند و یک شبکه پایش را بازطراحی[4] کردند. ایشان منحنی‌های انتقال اطلاعات-فاصله[5] (T–D) در مبحث آنتروپی گسسته را به‌کار گرفتند و روشی را معرفی کردند که منطقه مورد مطالعه را با کمک روابط تعادل فازی[6] و بر اساس مشخصاتی چون آنتروپی حاشیه‌ای[7]، میانگین، واریانس و موقعیت مکانی ایستگاه‌های پتانسیل دسته‌بندی می‌کرد. ایشان روش مذکور را برای منابع آب زیرزمینی آبخوان تهران-کرج با ۶۴ حلقه چاه اجرا کردند و شاهد نقش مؤثر آنتروپی حاشیه‌ای در دسته‌بندی بودند.

Prakash و Datta (۲۰۱۴) روشی برای طراحی شبکه پایش بهینه پیشنهاد دادند که در آن برنامه‌ریزی ژنتیک[8] (GP) با شبیه‌سازی-بهینه‌سازی ترکیب شد. در این روش، مدل‌های GP آموزش داده شده منتخب، برای محاسبه ضریب تأثیر[9] جریان‌های منبع آلودگی استفاده شدند. این ضریب تأثیر به‌عنوان یک معیار طراحی جهت یافتن بهترین موقعیت‌های پایش به‌کار گرفته شد. کارآیی روش مورد بحث برای یک منطقه مطالعاتی فرضی آزمون شد و نتایج نشان داد که راندمان کشف آلودگی با طراحی شبکه به این روش افزایش یافت.

Esquivel و همکاران (۲۰۱۵) یک شبکه پایش بهینه سطح آب زیرزمینی را با استفاده از تحلیل چندمعیاره[10] طراحی نمودند. این تحقیق با به‌کارگیری سامانه اطلاعات جغرافیایی[11] (GIS) بر روی آبخوانی در مکزیک اجرا شد. معیارهای مورد استفاده شامل نرخ افت سطح آب زیرزمینی، مقدار افت سطح آب زیرزمینی، خیز سطح آب زیرزمینی، گرادیان هیدرولیکی عمودی[12] و تراکم چاه‌ها بودند. از فرایند سلسله مراتبی تحلیلی[13] (AHP) برای وزن‌دهی به معیارها استفاده شد. سپس روش ترکیب خطی وزنی[14] (WLC) برای تعیین اولویت‌های نواحی لازم برای پایش سطح آب زیرزمینی به‌کار بسته شد. در نهایت، نقشه اولویت موقعیت‌ها برای پایش تهیه شد. ایشان روش پیشنهادی خود را برای استفاده دولت و سازمان‌ها به‌منظور استفاده در پایش منابع آب مناسب دانستند.

Mirzaei-Nodoushan و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیقی بر پایه بهینه‌سازی به بازطراحی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی پرداختند. در این تحقیق، از نسخه دوم الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب[15] (NSGA-II) و روش‌های درون‌یابی کریجینگ و IDW به‌منظور بهینه‌سازی شبکه استفاده شد. روش پیشنهادی برای طراحی یک شبکه پایش جدید بدون در نظر گرفتن شبکه پایش موجود در منطقه مطالعاتی در آبخوان دشت اشتهارد استفاده شد.

هدف اصلی این تحقیق، انتخاب چاه‌های مشاهداتی بهینه در شبکه پایش آب زیرزمینی موجود در منطقه و هم چنین یافتن چاه‌های مشاهداتی بهینه جدید برای تکمیل شبکه پایش موجود با به‌کارگیری یک روش کارآمد طراحی بر پایه بهینه‌سازی است. در

[1] Ant Colony Optimization
[2] Inverse Distance Weighting
[3] Contour mapping
[4] Redesign
[5] Transinformation-distance curves
[6] Fuzzy equivalence relations
[7] Marginal
[8] Genetic programming
[9] Impact factor
[10] Multicriteria analysis
[11] Geographic Information System
[12] Vertical hydraulic gradient
[13] Analytic Hierarchy Process
[14] Weighted Linear Combination
[15] Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II

Archive of SID

www.SID.ir

این تحقیق، شبکه پایش بهینه سطح آب زیرزمینی با اهداف کاهش تعداد چاه‌ها (هزینه‌ها) و افزایش دقت پایش شبکه طراحی می‌شود. فاصله چاه‌های مشاهداتی در شبکه پایش ارتباط مستقیم با دقت اطلاعات به‌دست آمده از شبکه پایش دارد و باید به گونه‌ای باشد که شبکه با نقص اطلاعات یا اطلاعات اضافی در مورد وضعیت آب زیرزمینی مواجه نشود. بدین ترتیب حاصل طراحی بهینه شبکه شامل تعیین تعداد و محل چاه‌های مشاهداتی و میزان دقت اطلاعات به‌دست آمده متناظر با هر تعداد چاه خواهد بود.

## مواد و روش‌ها

**روش‌های برآورد سطح آب زیرزمینی:** برای تعیین مقدار یک متغیر در هر نقطه، به کمک مقادیر موجود از متغیر در نقاط دیگر، از درون‌یابی استفاده می‌شود. درون‌یابی به روش‌های قطعی[1] و زمین‌آمار[2] تقسیم می‌شود. در روش قطعی مثل IDW برای محاسبه مقادیر از تابع ریاضی استفاده می‌شود. روش زمین‌آمار چون کریجینگ از برآوردهای احتمالاتی مثل واریانس بهره می‌برد.

IDW: در این روش، تخمین مقدار مجهول با استفاده از میانگین وزنی همه مقادیر معلوم انجام می‌شود و وزن متناسب با معکوس فاصله است. بنابراین، هر چه فاصله نقاط با مقدار معلوم به نقطه مجهول نزدیک‌تر باشد، در تخمین مقدار مجهول تأثیرگذارتر خواهد بود.

کریجینگ: از روش‌های رایج درون‌یابی زمین‌آمار می‌توان کریجینگ را نام برد. این روش انواع مختلفی از جمله ساده[3]، معمولی، جهانی[4]، رگرسیون[5] و کوکریجینگ[6] دارد که Cressie (۱۹۹۱) به تشریح آن‌ها پرداخته است. فرایند کریجینگ از دو بخش اصلی تشکیل می‌شود. بخش اول ساخت نیم‌تغییرنمای تجربی[7] است. پس از ایجاد نیم‌تغییرنمای تجربی لازم است یک مدل پارامتری[8] یا غیرپارامتری[9] به آن برازش داده شود. از مدل‌های شاخص می‌توان به مدل‌های کروی، نمائی[10]، گوسین و خطی[11] اشاره نمود. در بخش بعدی، وزن‌هایی در روند حل کریجینگ محاسبه می‌شوند. در نهایت برای تخمین کمینه خطای مربعات[12] که معرف دقت تخمین‌های کریجینگ است، از واریانس تخمین[13] یا واریانس کریجینگ استفاده می‌شود. اطلاعات با جزئیات بیشتر برای انواع روش‌های کریجینگ را می‌توان در تحقیق Cressie (۱۹۹۱) یافت.

در تحقیق حاضر، برای طراحی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی نیاز به بانک اطلاعات سطح آب زیرزمینی در منطقه است که برای تهیه آن از روش کریجینگ در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شده است. از طرفی، در طول فرایند بهینه‌سازی لازم است در هر تکرار سطح آب زیرزمینی در تمام منطقه محاسبه شود. کریجینگ از روش‌های با حجم محاسبه بالا است و برای به‌کارگیری در الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی، که شامل تکرارهای محاسباتی زیادی است، امکان‌پذیر نیست. از این‌رو، از روش IDW که پیچیدگی محاسباتی ندارد، برای برآورد سطح آب زیرزمینی طی بهینه‌سازی بهره‌برداری می‌شود.

**الگوریتم بهینه‌سازی:** بهینه‌سازی یعنی یافتن یک یا چند جواب موجه در یک مسئله که بهترین مقدار برای تابع یا توابع هدف باشند. در حل مسائل چندهدفه به‌دست آوردن مجموعه جواب بهینه (جبهه پرتو) مد نظر است. الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه[14] (MOEA)، که از روش‌های بهینه‌سازی تصادفی محسوب می‌شوند و فرایند تکامل طبیعی را شبیه‌سازی می‌کنند، قابلیت یافتن جواب‌های بهینه در این گونه مسائل را دارند. از الگوریتم‌های تکاملی رایج و قابل اعتماد در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه می-

[1] Deterministic
[2] Geostatistic
[3] Simple
[4] Universal
[5] Regression
[6] CoKriging
[7] Experimental semivariogram
[8] Parametric
[9] Nonparametric
[10] Exponential model
[11] Linear model
[12] Minimum squared error estimation
[13] Variance estimation
[14] Multi-Objective Evolutionary Algorithm

Archive of SID
www.SID.ir

توان به NSGA-II (Srinivas و Deb، ۱۹۹۴) اشاره نمود.

در NSGA-II، طبق رویه معمول، الگوریتم‌های تکاملی جمعیت اولیه تولید می‌شود. جمعیت بر اساس نامغلوبیت در هر جبهه رتبه‌بندی می‌شود. جواب‌های جبهه اول در جمعیت نسبت به سایر جواب‌ها کاملاً نامغلوب هستند و سایر جبهه‌ها به‌وسیله جواب‌های جبهه اول مغلوب می‌شوند. به همین ترتیب، جبهه‌های دوم، سوم و ... بر جبهه‌های بعدی غالب هستند. هر جواب در هر جبهه رتبه‌بندی شده است. به جواب‌های جبهه اول مقدار برازش یک داده می‌شود و به افراد در جبهه دوم مقادیر برازش دو و الی آخر تعلق می‌گیرد. علاوه بر مقدار برازش پارامتری به‌نام فاصله ازدحام برای هر فرد محاسبه می‌شود. فاصله ازدحام چگونگی نزدیک بودن یک جواب به همسایگانش را نمایش می‌دهد. هر چه فاصله ازدحام میانگین بزرگ‌تر باشد، تنوع در جمعیت بیشتر می‌شود. جمعیت بعدی از جمعیت فعلی به‌وسیله انتخاب تورنومنت دو-دویی[1] طبق رتبه و فاصله ازدحام تعیین می‌شوند. هر جواب با رتبه‌ی کمتر یا فاصله ازدحام بالاتر برگزیده می‌شود. جمعیت برگزیده، فرزندان را با عملگرهای تزویج و جهش تولید می‌کنند. مجموع جمعیت فرزندان و جمعیت فعلی (والد) دوباره بر اساس نامغلوبیت مرتب می‌شوند و N تا از بهترین افراد انتخاب می‌شوند (N اندازه جمعیت است) و جمعیت نسل بعدی را تشکیل می‌دهند. این روند تا تحقق شرایط خاتمه تکرار خواهد شد. شرط خاتمه در NSGA-II می‌تواند رسیدن به حد بیشینه مجاز تعداد تکرارهای الگوریتم باشد.

**منطقه مطالعاتی:** منطقه مطالعاتی این تحقیق آبخوان دشت اشتهارد با وسعت ۲۳۵ کیلومتر مربع است. دشت اشتهارد از غرب به دشت قزوین و از شرق به دشت تهران-کرج محدود می‌شود. شبکه چاه‌های مشاهده‌ای موجود در دشت اشتهارد دارای ۲۴ حلقه چاه است. از تعداد ۲۴ چاه مشاهداتی در محدوده آبخوان ۱۸ حلقه از چاه‌ها دارای آمار صحیح و نسبتاً کامل از سطح آب زیرزمینی هستند. با توجه به داده‌های موجود از این چاه‌های مشاهداتی دوره مدل‌سازی از سال مهر ۸۸ تا مهر ۹۲ در نظر گرفته شده است.

**روش تحقیق:** طراحی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی و تعیین موقعیت بهینه چاه‌های مشاهداتی در محدوده مطالعاتی دارای دو بخش است. در بخش اول بانک اطلاعاتی از سطح آب زیرزمینی تهیه می‌شود. بخش دوم شامل بهینه‌سازی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی با به‌کارگیری الگوریتم تکاملی می‌باشد.

**بخش اول: بانک اطلاعاتی سطح آب زیرزمینی**

منظور از بانک اطلاعاتی در آبخوان مقادیر سطح آب زیرزمینی در تمام محدوده آبخوان است. برای این منظور، مقادیر سطح آب زیرزمینی در تمام نقاط آبخوان به‌وسیله روش درون‌یابی کریجینگ به‌دست می‌آید. کریجینگ، مقادیر سطح آب زیرزمینی را در تمام نقاط پتانسیل موجود در محدوده آبخوان تعیین می‌کند و به این ترتیب این مقادیر در تمام محدوده به‌صورت گسسته و در نقاط با فاصله‌های مشخص برآورد می‌شود. کریجینگ از روش‌های دقیق و قابل اعتماد در زمینه درون‌یابی سطح آب زیرزمینی است و نتایج به‌دست آمده از آن بسیار به واقعیت نزدیک است. از این‌رو، در مسئله بهینه‌سازی شبکه پایش فرض می‌شود که داده‌های به‌دست آمده از کریجینگ مقادیر مشاهداتی سطح آب زیرزمینی در منطقه هستند و این مقادیر بانک اطلاعاتی سطح آب زیرزمینی منطقه نامیده می‌شوند.

**بخش دوم: بهینه‌سازی**

برای مسئله بهینه‌سازی طراحی شبکه پایش، لازم است یک مدل شامل تابع‌های هدف و قیود تعریف شود. کمینه کردن تعداد چاه‌های مشاهداتی در محدوده به‌عنوان نماینده هزینه‌های احداث، نگهداری و قرائت سطح آب و کمینه نمودن مقدار جذر مربع میانگین خطا[2] (RMSE) بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در تمام نقاط پتانسیل محدوده آبخوان دو تابع هدف مسئله هستند. روابط مسئله به قرار زیر می‌باشد.

$$\begin{aligned} &Minimize \quad f_1 = No.\,Wells \\ &Minimize \quad f_2 = RMSE \end{aligned} \qquad (۱)$$

[1] Binary tournament selection

[2] Root Mean Square Error

Archive of SID

www.SID.ir

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}(Hobs_i^t - Hest_i^t)^2}{TN}} \quad (۲)$$

که در آن، $f_1$ تابع هدف اول (تعداد چاه‌ها)، $f_2$ تابع هدف دوم (RMSE)، $Hobs_i^t$ مقدار مشاهداتی سطح آب زیرزمینی در نقطه $i$ و در پایان دوره زمانی $t$، $Hest_i^t$ مقدار محاسباتی سطح آب زیرزمینی در نقطه $i$ و در پایان دوره زمانی $t$، $T$ تعداد کل دوره‌های زمانی و $N$ تعداد کل نقاط پتانسیل محدوده می‌باشد.

شبیه‌سازی که جزئی از بخش بهینه‌سازی به شمار می‌رود، روابط حاکم بر مسئله و قیدها می‌باشد. در شبیه‌سازی مسئله، برای برآورد مقادیر محاسباتی سطح آب زیرزمینی در تمام نقاط پتانسیل از روش IDW، که یک روش درون‌یابی ساده، قابل اعتماد، قابل کدگذاری و سریع است، بهره‌برداری می‌شود. سپس RMSE شبکه طبق رابطه (۲) با استفاده از مقادیر محاسباتی به‌دست آمده از IDW و مقادیر مشاهداتی نقاط پتانسیل موجود در بانک اطلاعات محاسبه می‌شود و به این ترتیب تابع هدف اول به‌دست می‌آید. برای تعیین تابع هدف دوم، تعداد چاه‌های شبکه نیز مشخص می‌شود.

برای حل مسئله بهینه‌سازی دو هدفه، شبکه پایش سطح آب زیرزمینی NSGA-II انتخاب شد. این روش به سبب این‌که الگوریتمی توانا در حل مسائل با بیش از یک هدف است، برای حل مسائل سنگین قابل اطمینان است و عملکرد بالای آن در تحقیقات گذشته اثبات شده است. در تحقیق حاضر، دو سناریوی طراحی شبکه پایش آب زیرزمینی دنبال می‌شوند.

سناریوی ۱- انتخاب بهترین موقعیت چاه‌های مشاهداتی موجود در منطقه مطالعاتی: این سناریو این امکان را می‌دهد که اگر نیاز به انتخاب چند چاه از چاه‌های پایش موجود در منطقه باشد، بتوان با این سناریو به این هدف دست یافت. به‌طور مثال، تعداد ۱۸ چاه مشاهداتی در محدوده منطقه مطالعاتی این تحقیق وجود دارد که می‌توان تعیین کرد از بین این ۱۸ حلقه چاه، اگر نیاز باشد فقط پنج چاه قرائت شوند، آن چاه‌ها در کدام موقعیت واقع می‌شوند و مقدار RMSE متناظر با آن‌ها چقدر خواهد بود. به این ترتیب به ازای هر تعداد چاه لازم در شبکه (کمتر از ۱۸) می‌توان موقعیت و مقدار RMSE شبکه را حساب کرد. به‌عبارت دیگر تعداد نقاط پتانسیل در این سناریو ۱۸ نقطه است.

سناریوی ۲- افزودن چاه‌های اضافه به شبکه چاه‌های مشاهداتی موجود در منطقه مطالعاتی: در این سناریو چاه‌های موجود در شبکه پایش فعلی حفظ و در صورت نیاز به چاه‌های مشاهداتی بیشتر، بهترین موقعیت چاه‌ها با کم‌ترین RMSE یافت می‌شوند. به‌عبارتی در مطالعه موردی این تحقیق، شبکه پایش با تعداد چاه بیشتر از ۱۸ طراحی می‌شود و ۱۸ حلقه از چاه‌های مشاهداتی دارای موقعیت ثابت هستند.

به‌طور کلی روند بهینه‌سازی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی به این صورت است که ابتدا بانک اطلاعات یا مقادیر مشاهداتی به NSGA-II داده و توابع هدف در الگوریتم معرفی می‌شود. در الگوریتم هر کروموزوم به تعداد نقاط پتانسیل آبخوان ژن دارد و مقادیر صفر (نبود چاه) و یک (وجود چاه) را می‌تواند دریافت کند. بنابراین، مجموع ژن‌ها در هر کروموزوم برابر با تعداد چاه‌ها (تابع هدف اول) در آبخوان است. پس از تولید کروموزوم‌ها با توجه به موقعیت چاه‌ها مقدار سطح آب زیرزمینی در تمام نقاط پتانسیل به روش IDW و RMSE (تابع هدف دوم) با داشتن مقادیر مشاهداتی (بانک اطلاعات) و محاسباتی (IDW) محاسبه می‌شود. در این مرحله از بهینه‌سازی، شرط توقف الگوریتم بررسی می‌شود و در صورت نداشتن شرط لازم تعدادی کروموزوم جدید تولید و محاسبات تکرار می‌شود. این تکرار تا رسیدن به شرط توقف ادامه خواهد داشت (شکل ۱).

## نتایج و بحث

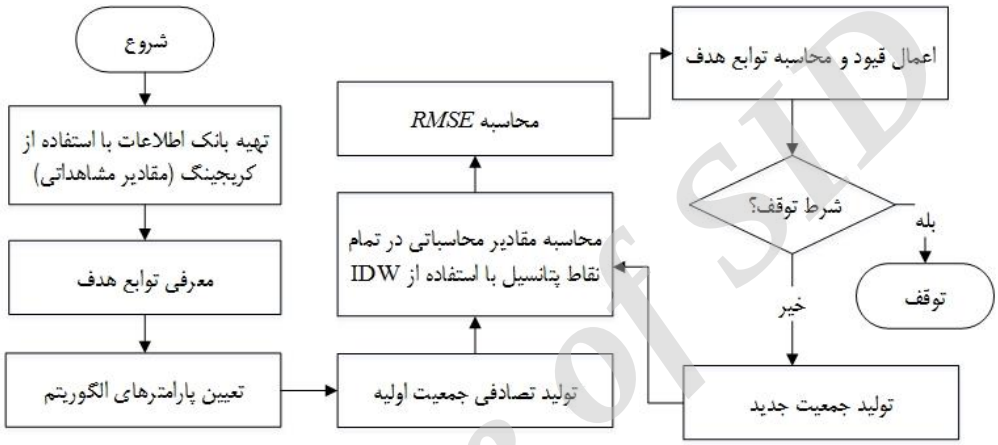
بانک اطلاعات سطح آب زیرزمینی آبخوان اشتهارد با استفاده از کریجینگ ایجاد شد. به این منظور، داده‌های سطح آب زیرزمینی ۱۸ حلقه چاه مشاهداتی برای چهار سال آبی استفاده و مقادیر سطح آب زیرزمینی برای نقاط پتانسیل محدوده ماه به ماه درون‌یابی شد. این مقادیر با دقت قابل قبولی به‌عنوان مقادیر مشاهداتی سطح آب زیرزمینی در محدوده آبخوان در نظر گرفته شد.

Archive of SID

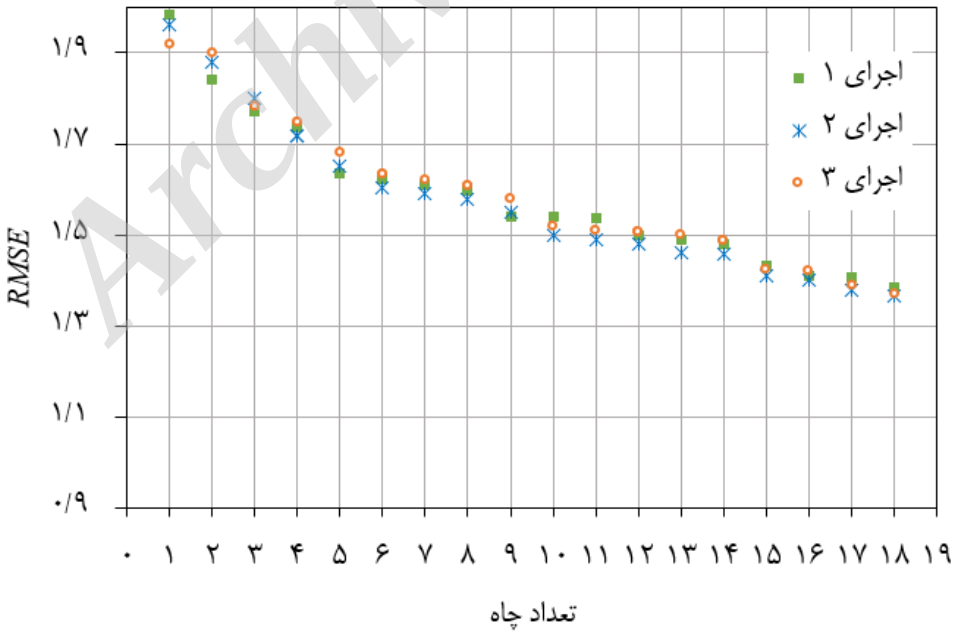
www.SID.ir

برای حل مسئله بهینه‌سازی دو هدفه طراحی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی از الگوریتم NSGA-II بهره‌گیری شد. برای تعداد تکرار، اندازه جمعیت، احتمال تزویج و احتمال جهش در NSGA-II، به‌ترتیب مقادیر ۱۰۰۰، ۵۰، ۰/۷ و ۰/۲ در نظر گرفته شدند. بیشینه تعداد چاه‌های شبکه پایش ۳۰ چاه انتخاب شد تا فضای جستجوی بهینه‌سازی برای NSGA-II نامحدود نباشد و در بازه مشخصی به‌دنبال جواب‌های بهینه باشد. نتایج برای هر سناریو به قرار زیر است.

**الف- سناریوی ۱:** در این سناریو شبکه پایش تنها با چاه‌های مشاهداتی موجود در منطقه مطالعاتی اشتهارد باز طراحی شد. نتایج این سناریو به‌صورت جبهه‌های پرتوی حاصل از سه اجرا در شکل ۲ مشاهده می‌شود و همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است، جبهه‌های پرتوی سه اجرا بسیار به هم نزدیک هستند و این سندی بر قابلیت اطمینان روش پیشنهادی است.




**شکل ۱**- روند نمای حل مسئله طراحی




**شکل ۲**- جبهه‌های پرتوی طراحی شبکه پایش برای سه اجرای مختلف (سناریوی ۱)

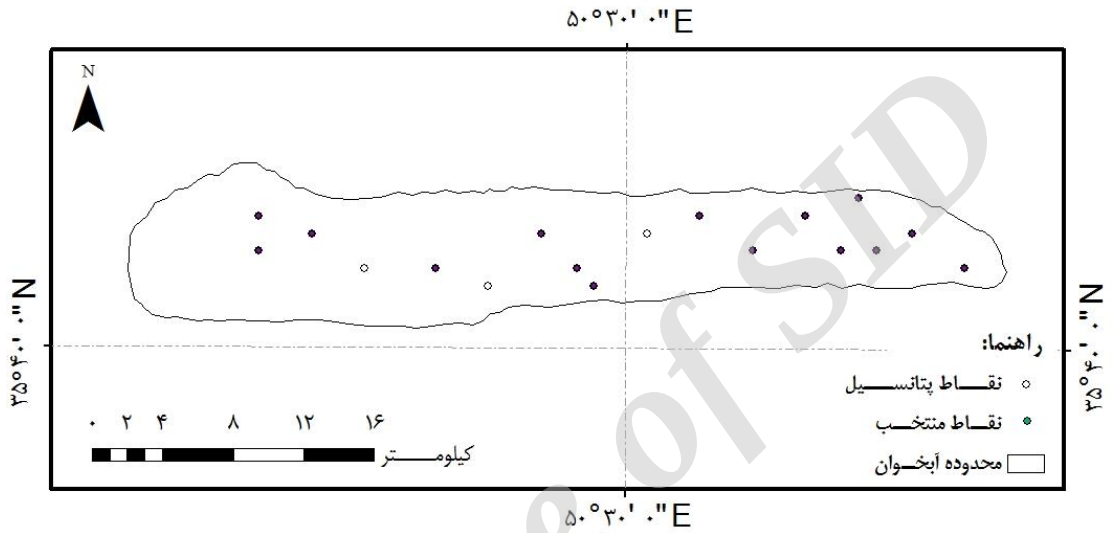
Archive of SID

www.SID.ir

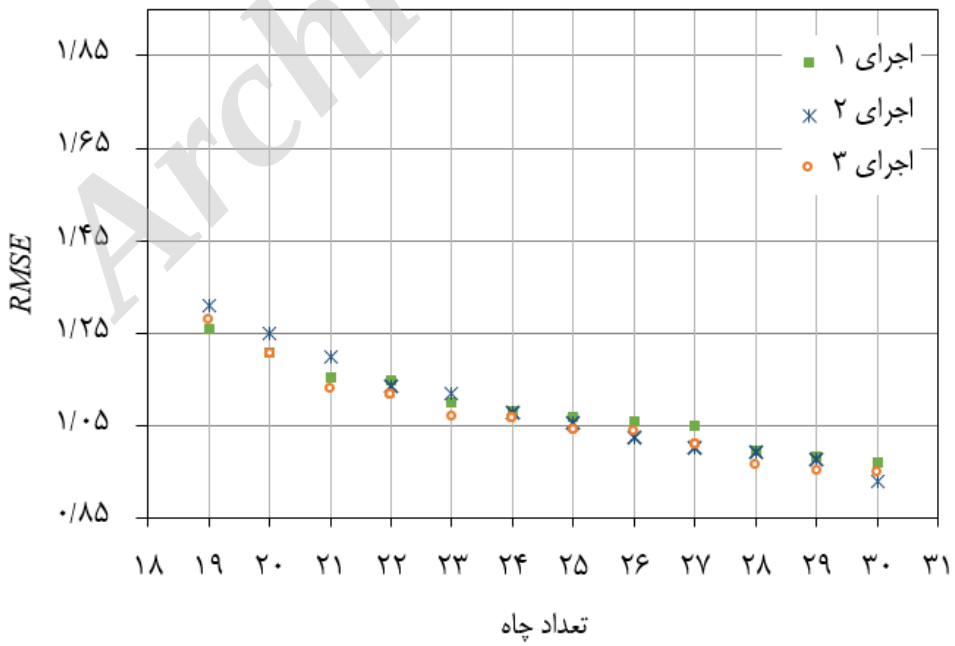
برای مشاهده نحوه آرایش چاه‌ها در محدوده آبخوان، نمونه‌ای از موقعیت چاه‌های مشاهداتی منتخب در شکل ۳ به نمایش در آمده است.

**ب- سناریوی ۲:** در این سناریو تعداد ۱۸ چاه مشاهداتی موجود در محدوده آبخوان حفظ شدند و موقعیت‌های بهینه تعداد چاه‌های اضافه بر آن ۱۸ حلقه چاه مورد جستجو قرار گرفتند. جبهه‌های پرتوی به‌دست آمده در سناریوی ۲ به‌صورت شکل ۴ به‌دست آمد و نزدیکی سه جبهه پرتو به یکدیگر قابل توجه است. این هم‌گرایی جواب‌های سه اجرا نشانه اطمینان‌پذیری روش بهینه‌سازی با وجود تصادفی بودن روند حل است.

در شکل ۵ نمونه‌ای از شبکه پایش بهینه سطح آب زیرزمینی در سناریوی ۲ آورده شده است. با توجه به این شکل، چاه‌های منتخب به‌طور مناسبی در سطح آبخوان توزیع شدند.

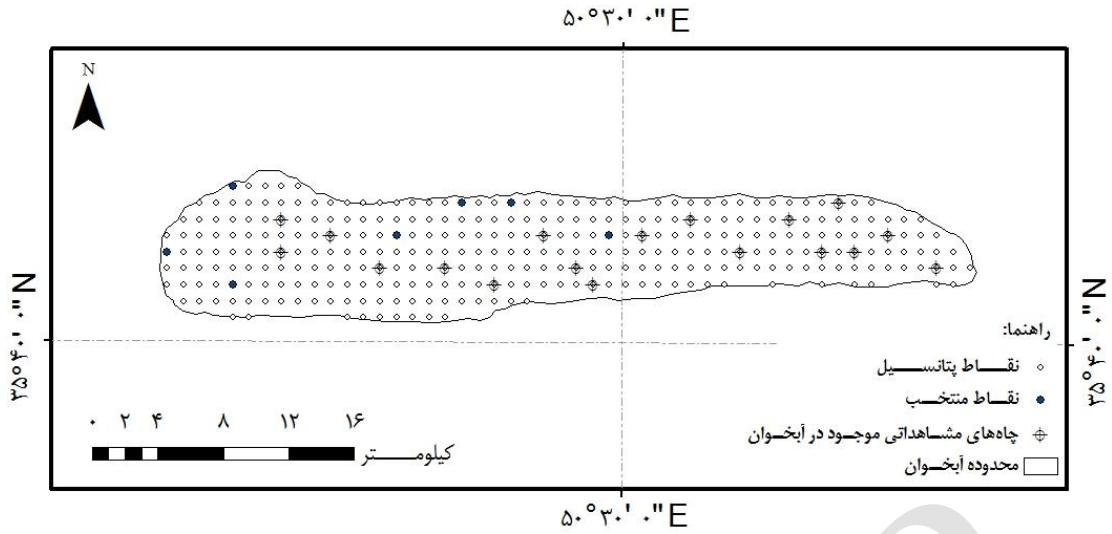



**شکل ۳**- چاه‌های منتخب شبکه پایش برای تعداد ۱۵ چاه (سناریوی ۱)




**شکل ۴**- جبهه‌های پرتوی طراحی شبکه پایش برای سه اجرای مختلف (سناریوی ۲)

Archive of SID
www.SID.ir

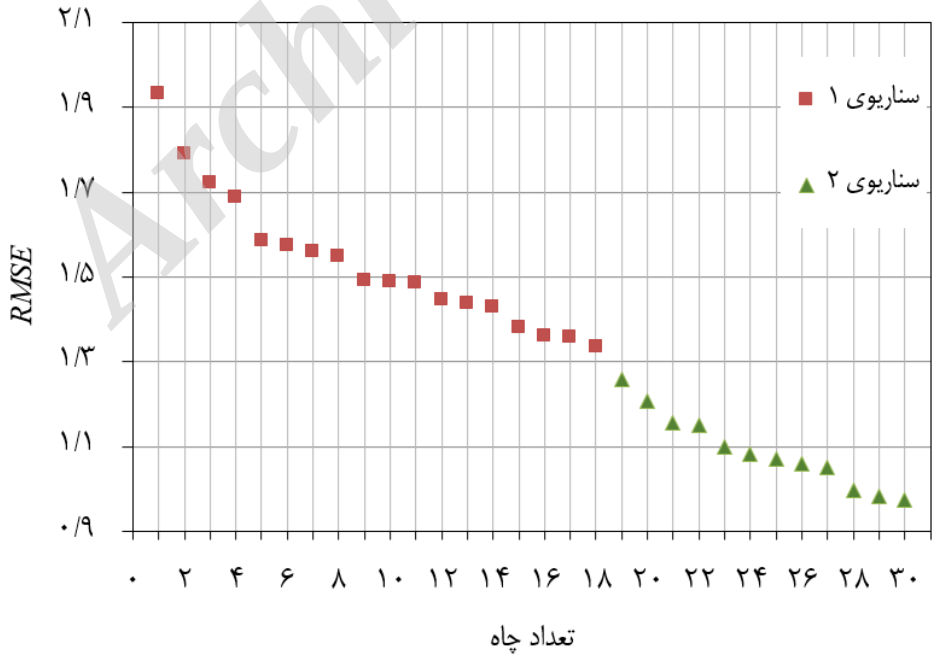



**شکل ۵**- چاه‌های منتخب شبکه پایش برای تعداد ۲۵ چاه (سناریوی ۲)

برای مشاهده جبهه‌های پرتوی دو سناریو در کنار یکدیگر، نتایج حاصل از اجرای ۱ برای دو سناریو در شکل ۶ ارائه شده است.

## نتیجه‌گیری

به‌منظور شناسایی و پیش‌بینی وضعیت آب زیرزمینی، ضروری است شبکه پایش سطح آب زیرزمینی با دقت قابل قبولی طراحی شود. در این تحقیق، شبکه پایش سطح آب زیرزمینی در دشت اشتهارد با دو سناریوی مختلف طراحی شد. در سناریوی ۱ از بین چاه‌های مشاهداتی موجود در منطقه مطالعاتی به ازای هر تعداد چاه مورد نظر بهترین موقعیت چاه‌ها انتخاب شد. در حقیقت بیشینه تعداد چاه‌ها برابر ۱۸ حلقه چاه (همان شبکه پایش موجود در منطقه) بود و بهترین موقعیت چاه‌ها، برای شبکه‌ای با تعداد یک تا ۱۷ چاه مشخص شد.




**شکل ۶**- جبهه‌های پرتوی دو سناریو در اجرای ۱

سناریوی ۲ به این صورت اجرا شد که ۱۸ حلقه چاه مشاهداتی موجود در منطقه به‌طور ثابت در شبکه حفظ شدند و علاوه بر این ۱۸ حلقه چاه، در صورت نیاز به چاه‌های اضافه، محل بهینه چاه‌های اضافه مشخص شد. روش پیشنهادی

Archive of SID

www.SID.ir

دارای دو بخش بانک اطلاعاتی و بهینه‌سازی بود. در بخش اول، به کمک روش کریجینگ مقادیر سطح آب زیرزمینی در تمام نقاط محدوده آبخوان تعیین و به‌صورت سری زمانی در بانک اطلاعاتی ذخیره شد. بخش دوم شامل بهینه‌سازی شبکه چاه‌های مشاهداتی به‌وسیله الگوریتم قدرتمند و پرکاربرد NSGA-II بود و برای محاسبه مقادیر محاسباتی سطح آب زیرزمینی در شبیه‌ساز از درون‌یابی IDW بهره گرفته شد. اهداف مسئله بهینه‌سازی، کمینه کردن تعداد چاه‌های مشاهداتی و کمینه نمودن مقدار RMSE بود.

با توجه به جبهه‌های پرتوی به‌دست آمده در سناریوهای ۱ و ۲، شبکه‌های با تعداد چاه پایین (یک، دو و سه) اطلاعات بسیار کمی (مقدار RMSE زیاد است) از آبخوان به‌دست می‌دهند. به تدریج با افزایش تعداد چاه‌ها مقدار خطا کاهش می‌یابد و به‌صورتی که برای تعداد چاه‌های ۲۸، ۲۹ و ۳۰ نرخ کاهش خطا پایین آمده و RMSE آن‌ها بسیار به یکدیگر نزدیک است. این موضوع نشان می‌دهد که در سناریوی ۲ پس از تعداد ۲۸ چاه، تقریباً تمام نقاط ضروری برای پایش سطح آب زیرزمینی به‌وسیله چاه‌های بهینه اشغال شده‌اند و افزودن چاه‌های بیشتر اثر چندانی در کاهش RMSE نخواهد داشت. در مجموع اگر لازم باشد، از چاه‌های موجود در شبکه چند چاه حذف شوند، (سناریوی ۱) و یا اگر قرار باشد به چاه‌های موجود در شبکه تعدادی چاه دیگر نیز افزوده شود (سناریوی ۲)، روش پیشنهادی توانایی طراحی این شبکه‌ها را دارد.

## منابع مورد استفاده


1. Asefa, T., M.W. Kemblowski, G. Urroz, M. McKee and A. Khalil. 2004. Support vectors-based groundwater head observation networks design. Water Resources Research, 40(11), 22-36.
2. Cressie, N.A.C. 1991. Statistics for spatial data. John Wiley and Sons, 165 pages.
3. Esquivel, J.M., G.P. Morales and M.V. Esteller. 2015. Groundwater monitoring network design using GIS and multicriteria analysis. Water Resources Management, 29(9): 3175-3194.
4. Hudak, P.F. and H.A. Loaiciga. 1993. An optimization method for monitoring network design in multilayered groundwater flow systems. Water Resources Research, 29(8): 2835-2845.
5. Li, Y. and A.B.C. Hilton. 2005. Reducing spatial sampling in long-term groundwater monitoring networks using ant colony optimization. International Journal of Computational Intelligence Research, 1(1): 19-28.
6. Loaiciga, H., R.J. Charbeneau, L.G. Everett, G.E. Fogg, B.F. Hobbs and S. Rouhani. 1992. Review of ground-water quality monitoring network design. Journal of Hydraulic Engineering, 118(1): 11-37.
7. Mirzaei-Nodoushan, F., O. Bozorg Haddad and M. Khayyat Kholghi. 2016. Two-objective design of groundwater-level monitoring network using NSGA-II in Eshtehard Plain. Iranian Journal of Soil and Water Research, DOI: IJSWR-201508-667281 (Accepted in Persian).
8. Owlia, R.R., A. Abrishamchi and M. Tajrishy. 2011. Spatial–temporal assessment and redesign of groundwater quality monitoring network: A case study. Environmental Monitoring Assessment, 172(1-4): 263-273.
9. Prakash, O. and B. Datta. 2014. Multiobjective monitoring network design for efficient identification of unknown groundwater pollution sources incorporating genetic programming–based monitoring. Journal of Hydrologic Engineering, 19(11): 19-32.
10. Srinivas, N. and K. Deb. 1994. Multi-objective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. Evolutionary Computation, 2(3): 221-248.
11. Storck, P., J.W. Eheart and A.J. Valocchi. 1997. A method for the optimal location of monitoring wells for detection of groundwater contamination in three-dimensional aquifers. Water Resources Research, 33(9): 2081-2088.
12. Wu, Y. 2004. Optimal design of a groundwater monitoring network in Daqing, China. Environmental Geology, 45(4): 527-535.


Archive of SID

www.SID.ir

DOI: 10.22092/ijwmse.2019.118434

# Optimization and development of groundwater-level monitoring network in Eshtehard Plain

**Fahimeh Mirzaei-Nodoushan[*1], Omid Bozorg Haddad[2] and Majid Khayat Kholghi[3]**
[1] MSc Student, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Iran,
[2] Associate Professor, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Iran
and [3] Professor, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, Iran

Received: 08 August 2016 Accepted: 31 December 2016

## Abstract

Continuous monitoring of wells discharge and charge and groundwater quantitative and qualitative variations is very important in groundwater resources management. Groundwater monitoring network could provide information on quantitative and qualitative variations in groundwater situations. Hence it would be used to predict the behavior of the aquifer in the future. This study describes an optimizing method to design the optimum groundwater-level monitoring network in aquifer of Eshtehard Plain. Two scenarios were considered to optimize the locations of the observation wells: 1) exploring optimal locations of existing observation wells and 2) adding optimal observation wells to existing well network. Kriging method was utilized to estimate groundwater-level for preparing the database. Optimization of groundwater monitoring network with two objectives: 1) minimizing root mean square error and 2) minimizing number of wells, was implemented by non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II). The results show that by using this method it is possible to remove redundant wells in a monitoring network or to add new wells in case of shortage of observation wells in a network having acceptable accuracy.

Keywords: Interpolation, Groundwater-level, Monitoring network, NSGA-II, Two-objective optimization

Archive of SID

[*] Corresponding author: fhmnodoushan@ut.ac.ir

www.SID.ir