تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۷، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۵ (ص ۳۵۴-۳۴۵)

طراحی دوهدفه شبکه پایش سطح آب زیرزمینی با استفاده از NSGA-II در دشت اشتهارد

فهیمه میرزائی ندوشن[1]*، امید بزرگ‌حداد[2]، مجید خیّاط خلقی[3]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲. دانشیار، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۳. استاد، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۵/۳۱- تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۱۰/۵)

چکیده

پایش کمّی آب زیرزمینی، با هدف بررسی و تعیین عوامل مؤثر در رفتار آبخوان‌ها نقش به سزایی در مدیریت آب زیرزمینی هر منطقه دارد. بنابراین برای مطالعه تغییرات زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی، شبکه پایش کمّی آب زیرزمینی مورد نیاز است. در تحقیق حاضر طراحی بهینه بلندمدت شبکه پایش سطح آب زیرزمینی به کمک روشی بر پایه بهینه‌سازی در آبخوان دشت اشتهارد انجام گرفته است. پایگاه داده مورد نیاز، به کمک درون‌یابی کریجینگ تهیه شده است. بهینه‌سازی شبکه چاه‌ها توسط نسخه دوم الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) با اهداف کمینه نمودن مقدار ریشه مربعات میانگین خطا (*RMSE*) و کمینه نمودن تعداد چاه‌ها اجرا شده است. در بخش شبیه-سازی مسئله از درون‌یابی وزن‌دهی فاصله معکوس (IDW) برای مقادیر سطح آب زیرزمینی محاسباتی استفاده شد و با مقادیر مشاهداتی تهیه شده در پایگاه داده مقایسه شدند. نتیجه این تحقیق، ارائه یک جبهه پرتو با نمایش تعداد چاه در مقابل *RMSE* متناظر آن بود که می‌تواند دستورالعملی برای طراحی شبکه پایش کمّی آب زیرزمینی باشد. به این صورت که با تعیین دقت لازم در داده‌های حاصل از شبکه پایش می‌توان تعداد چاه‌ها و موقعیت آن‌ها را در منطقه مطالعاتی مشخص نمود.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی دوهدفه، شبکه پایش سطح آب زیرزمینی، کریجینگ، IDW، NSGA-II.

مقدمه

اهمّیت بالای آب در تمام بخش‌های زندگی بشر شامل شرب، صنعت و کشاورزی، باعث شده است تمرکز بر محورهای اساسی چون مدیریت تقاضا و حفظ کیفیت منابع آب ضرورت یابد. برای برداشت بدون اثرات جانبی آب زیرزمینی، جمع‌آوری جامع و کافی داده‌های آب زیرزمینی به کمک شبکه پایش آب زیرزمینی بسیار مهم است. امروزه پایش ابزاری مهم در جمع آوری اطّلاعات برای بررسی تغییرات فرآیندهای محیط زیست در مدیریت آب‌های سطحی و زیرزمینی محسوب می‌شود. در صورت نبود برنامه‌ریزی پایش مناسب، امکان قضاوت علمی، کارشناسانه و مستند در مورد مدیریت منابع آب وجود نخواهد داشت. مطالعه بر روی طراحی انواع شبکه‌های پایش منابع آب اعم از کمّی و کیفی از گذشته تا به امروز مورد توجه بوده است.

در دهه ۱۹۸۰، به سبب بحران در آلودگی آب‌های زیرزمینی توجه ویژه‌ای به تشخیص و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی آلوده معطوف شد. رویکردهای طراحی شبکه پایش آب زیرزمینی توسط Loaiciga *et al.* (1992) به دو دسته‌بندی اصلی هیدروژئولوژیکی و آماری تقسیم شده‌اند. هم‌چنین با رواج استفاده از ابزارهای داده‌کاوی[1] در علوم مهندسی آب در دهه اخیر، این ابزارها به طراحی شبکه پایش منابع آب راه یافته‌اند. به همین سبب می‌توان رویکرد داده‌کاوی را نیز به عنوان دسته سوم رویکردهای طراحی شبکه در نظر گرفت.

رویکردهای هیدروژئولوژیکی با بهره‌گیری از اطّلاعات متخصصان هیدروژئولوژی منطقه به طراحی یک شبکه پایش با اهداف مشخص شده توسط متخصصان می‌پردازند. این اهداف می‌توانند شامل تعیین نوسانات سطح آب زیرزمینی، کشف آلودگی و ... باشند. Wilson *et al.* (1992) یک مدل کارآمد بر پایه رویکرد هیدروژئولوژیکی را با هدف طراحی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی معرفی کردند. روش آن‌ها جابه‌جایی توده-های آلودگی را از هر ایستگاه شبیه‌سازی می‌کرد و راندمان طراحی شبکه چاه‌های پیشنهادی را در کشف توده آلودگی

* نویسنده مسئول: Fhmnodoushan@ut.ac.ir

1. Data Mining

بررسی می‌کرد. نتایج نشان دادند که این مدل، توانایی قابل توجهی در طراحی هیدروژئولوژیکی شبکه پایش کیفی دارد و مدعی شدند که این رویکرد می‌تواند در مسائل مختلف قابل استفاده باشد و عدم قطعیت در طراحی را نیز در نظر بگیرد.

رویکردهای آماری به این مسئله که اطّلاعات در دسترس انسان با عدم قطعیت مربوط به هیدروژئولوژی منطقه همراه است توجه دارند و به دنبال راهی برای طراحی شبکه پایش با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها هستند. رویکردهای آماری شامل روش‌های شبیه‌سازی، واریانس مبنا، احتمالاتی مبنا و بهینه-سازی هستند.

از نمونه پژوهش‌ها در زمینه شبیه‌سازی می‌توان به تحقیق McKinny and Loucks (1992) اشاره نمود. ایشان یک الگوریتم طراحی شبکه پایش برای بهبود اطمینان‌پذیری پیش‌بینی‌های مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی ارائه نمودند. واریانس متغیرهای وضعیت پیش‌بینی شده، تراز هیدرولیکی و تمرکز آلودگی به عنوان سنجش اطمینان‌پذیری پیش‌بینی مدل استفاده شدند. نتایج حاکی از آن بودند که افزایش قابل ملاحظه‌ای در اطمینان‌پذیری مدل شبیه‌سازی ناشی از طراحی شبکه به روش پیشنهادی به دست آمد. از طرفی غیرحساس بودن میانگین پیش‌بینی و حساس بودن واریانس پیش‌بینی در شبکه طراحی شده مشاهده شد. یک ابزار اکتشافی[1] فیزیک مبنای مونت کارلو[2] (MC) توسط Hudak (2006) برای تعیین موقعیت چاه‌های کشف آلودگی در آبخوان معرفی شد. این ابزار فاصله بین چاه‌ها را بیشینه می‌کرد تا زمانی که اطمینان حاصل می‌شد هیچ آلودگی پتانسیلی بدون پایش باقی نمی‌ماند. جواب‌های این ابزار با جواب‌های روش دیگری که شبکه را با چاه‌های هم‌فاصله طراحی می‌کرد، مقایسه شد. هر دو روش راندمان بالایی برای کشف آلودگی و تعیین آرایش شبکه پایش داشتند. ایشان اظهار داشت که ابزار پیشنهادی مذکور می‌تواند در ترکیب با روش دوم برای شناسایی موقعیت کارآمد چاه‌های پایش قابل استفاده باشد.

تحقیق Yang *et al.* (2008) مثالی از به‌کارگیری رویکردهای درون‌یابی زمین‌آمار[3] (از روش‌های واریانس مبنا) در طراحی شبکه پایش آب زیرزمینی است. ایشان در تحقیق خود انحراف معیار کریجینگ میانگین[4] را معیار تعیین تراکم شبکه پایش سطح آب زیرزمینی در نظر گرفتند و برای محاسبه آن از GIS استفاده کردند. آن‌ها در یک منطقه مطالعاتی در چین با ۱۸ چاه، مقایسه‌ای بین سه پارامتر تغییرنما[5] مربوط به سه مدل نمایی[6]، گوسین[7] و کروی[8] انجام دادند. نتایج نشان دادند که مدل گوسین برای این مورد مطالعاتی مناسب‌تر بود و هم‌چنین ۳۷ حلقه چاه جدید باید به شبکه اضافه می‌شد. غربال کردن آماری[9] از دیگر راه‌کارهای واریانس مبنا است که مورد استفاده Dokou and Pinder (2009) قرار گرفت. هدف تحقیق آن‌ها ارائه یک راهبرد جستجویی بود که منابع آلودگی را با کم‌ترین تعداد نمونه‌برداری شناسایی می‌نمود. این راهبرد شامل یک مدل جریان و انتقال آب زیرزمینی تصادفی[10] MC، یک مجموعه از قبل تعیین شده از موقعیت‌های منابع آلودگی پتانسیل و یک غربال کالمن[11] که موقعیت تمرکز آلودگی شبیه‌سازی شده را توسط داده‌های تمرکز آلودگی به روز می‌کند، بود. الگوریتم جستجوی پیشنهادی با مثال‌های فرضی امتحان شد و نتایج به دست آمده و تحلیل‌های حساسیت انجام شده، قابلیت روش پیشنهادی برای مسائل پیچیده و واقعی را نشان داد.

در پژوهشی توسط Mogheir *et al.* (2003) برای طراحی محل نمونه‌برداری شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی از تئوری آنتروپی (از روش‌های احتمالاتی مبنا) بهره گرفته شد. ایشان برای مجموعه‌ای از متغیرهای کیفی آب زیرزمینی مدل انتقال اطّلاعات[12] و مدل همبستگی[13] را تعریف و مشاهده کردند که مدل انتقال اطّلاعات موقعیت مکانی چاه‌ها را بهتر از مدل همبستگی تعیین می‌کرد. از طرفی آن‌ها دریافتند که پارامترهای مربوط به مدل انتقال اطّلاعات که وابستگی چاه‌ها نسبت به هم را نشان می‌داد، برای برخی متغیرهای کیفی مشابه به دست آمد. این شباهت پارامترهای متغیرهای کیفی درصد وابستگی بین متغیرها را نشان داد و از این حیث می‌توان با عدم بررسی برخی از متغیرهای کیفی حاضر در برنامه پایش، هزینه‌ها را کاهش داد.

استفاده از ابزارهای بهینه‌سازی جستجوگر چون GA و SA در طراحی بهینه شبکه پایش آب زیرزمینی از دهه ۷۰ میلادی هم‌زمان با مباحث طراحی شبکه بسیار رواج داشت و امروزه از ابزارهای کارآمد و پرطرفدار در طراحی شبکه می‌باشند.

1. Graphical Heuristic
2. Monte Carlo Physics-Based Simulation
3. Geostatistic Interpolation Approach
4. Average Kriging Standard Deviation
5. Variogram
6. Exponential
7. Gaussian
8. Spherical
9. Statistical Filtering
10. Stochastic Groundwater Flow and Transport Model
11. Kalman Filter
12. Transinformation Model
13. Correlation Model

یک روش با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط[1] توسط Datta and Dhiman (1996) ارائه شد که با به‌کارگیری رویکرد ماتریس پاسخ[2] به مدل جریان و انتقال آب زیرزمینی متصل شد. هم‌چنین برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در شبیه‌سازی، یک خطای تصادفی به عناصر ماتریس پاسخ اضافه شد. ارزیابی عملکرد مدل ایجاد شده، قابلیت بالقوه مدل را برای طراحی شبکه‌های پایش کیفی آب زیرزمینی نشان داد. در تحقیقی از Wu *et al.* (2006) کارآیی دو شیوه، GA ساده MC[3] (MCSGA) و GA نامنظم[4] (NGA)، برای طراحی شبکه‌های نمونه‌برداری مقرون به صرفه با وجود عدم‌قطعیت‌ها در هدایت هیدرولیکی، ارزیابی و مقایسه شدند. در هر دو روش، GA با یک شبیه‌ساز جریان و انتقال عددی و یک تخمین زننده توده آلودگی سراسری[5] برای بهینه‌سازی شبکه پایش توده آلودگی ادغام گردید. در روش MCSGA هر طراحی بهینه را برای تعداد زیادی از معرف‌های[6] تولید شده برای نمایش عدم قطعیت هدایت هیدرولیکی انجام گرفت. روش NGA بر نمونه کوچکتری از معرف‌های هدایت هیدرولیکی متکی بود. نتایج این تحقیق برتری NGA نسبت به MCSGA را برای طراحی شبکه نمونه‌برداری مقرون به صرفه تحت شرایط عدم قطعیت نمایش دادند. هم‌چنین MCSGA در مقایسه با NGA باعث کاهش زمان اجرای بهینه‌سازی گردید. در تحقیق دیگری در پی ارائه روشی برای طراحی بهینه شبکه‌های پایش کیفی آب زیرزمینی تحت شرایط عدم قطعیت شناختی[7] در پیش‌بینی حرکت توده آلودگی، برای نمایش تراکم‌های زمـانی و مـکانی از کریجینگ معمولی فـازی[8] (FOK) و برای حل مدل طراحی شبکه پایـش از نسخه دوم الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب[9] (NSGA-II) استفاده شد. با بررسی نتایج به دست آمده، روش پیشنهادی روشی کارآمد برای طراحی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی تحت شرایط عدم قطعیت پیش‌بینی حرکت توده آلودگی شناخته شد (Dhar and Patil, 2012).

در برخی از مطالعات، تلاشی برای ایجاد یک روش ترکیبی توانمند با ترکیب چند روش معمول و موجود بوده است. یک مدل طراحی شبکه پایش توسط Hudak and Loaiciga (1993) معرفی شد که موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری را تعیین می‌کرد. طراحی بر پایه تحت پوشش قرار دادن آبخوان از نظر خطرپذیری آلودگی تعریف شد. ایشان دو روش کمّی (آماری) و کیفی (هیدروژئولوژیکی) را برای راه‌کارهای طراحی در آبخوان چندلایه اعمال نمودند. آزمودن این روش روی یک مورد مطالعاتی نشان داد که آرایش‌های شبکه پایش حاصل، دو مشخصه را ارائه می‌دهند: (۱) جمع شدن چاه‌ها در اطراف خروجی‌های آلودگی در مرزهای منبع آلودگی و (۲) پوشش مناطق خالی متعدد که مستعد ابتلا به آلودگی بودند. هدف Esquivel *et al.* (2015) استفاده از تحلیل چندمعیاره[10] برای طراحی یک شبکه پایش بهینه سطح آب زیرزمینی بود. تحلیل چندمعیاره با کمک GIS بر روی آبخوانی در مکزیک اعمال شد. معیارهای هیدروژئولوژیکی عبارت‌اند از: نرخ کاهش سطح آب زیرزمینی، کاهش در سطح آب زیرزمینی، افزایش در سطح آب زیرزمینی، گرادیان هیدرولیکی عمودی و تراکم چاه‌ها. برای وزن‌دهی به معیارها از AHP استفاده شد و نرخ پایداری[11] برابر با ۰/۰۸ به دست آمد. سپس آن‌ها روش ترکیب خطی وزنی[12] (WLC) را به کار بستند که نتیجه آن، ارائه یک نقشه بود که موقعیت‌های مناطق اولویت‌دار برای پایش را نشان می‌داد. ایشان روش پیشنهادی خود را برای استفاده دولت و سازمان‌ها به منظور تعیین راهبردهای پایش منابع آب مناسب دانستند. برنامه نرم‌افزاری جدیدی به نام MSANOS توسط Barca *et al.* (2015) معرفی شد که شامل چند روش بهینه‌سازی مکانی هستند. این روش‌ها شامل SA مکانی[13] (SSA)، حذف حریص[14] (GD) و جکنایف[15] بودند و روش‌هایی بودند که بیش‌ترین کارآیی را از بین روش‌های گزارش شده در تحقیقات مختلف داشتند. ساختار MSANOS از سه بخش[16] اصلی تشکیل شده بود: (۱) بخش ورودی، (۲) بخش بهینه‌سازی و (۳) بخش خروجی. آن‌ها نشان دادند که MSANOS قادر به بازطراحی یک شبکه پایش موجود با اضافه یا کم کردن ایستگاه‌ها بود. توابع هدف در این نرم‌افزار بر پایه مدل[17] و بر پایه طراحی[18] تعبیه شده بود. تابع هدفی که یک مشخصه میانگین از ناحیه پایش شده را در مقیاس بزرگ بررسی کند، طراحی مبنا و تابع

1. Mixed-Integer Programming Algorithm
2. Response Matrix Approach
3. MC Simple GA
4. Noisy GA
5. Global Plume Estimator
6. Realization
7 .Epistemic Uncertainty
8. Fuzzy Ordinary Kriging
9. Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II
10. Multicriteria Analysis
11. Consistency Ratio
12. Weighted Linear Combination
13. Spatial SA
14. Greedy Deletion
15. Jacknife
16. Module
17. Model-base
18. Design-base

هدفی که رفتار پدیده‌ای را در مقیاس کوچک پایش کند، مدل مبنا گویند. این نرم‌افزار برای بررسی یک شبکه پایش سطح آب زیرزمینی در آبخوانی در جنوب ایتالیا آزمایش شد و نتایج کارایی خوب نرم‌افزار در منطقه مطالعاتی را نشان داد. این پروژه هم‌چنان با هدف افزایش انعطاف‌پذیری و گسترده‌سازی دامنه کاربرد در حال پیشرفت است.

از جمله رویکردهای طراحی شبکه رویکرد داده‌کاوی است که یکی از شیوه‌های پردازش داده و اطّلاعات و شاخه‌ای از هوش مصنوعی[1] (AI) می‌باشد و به کمک ابزارهای تجزیه و تحلیل داده‌ها، الگو و رابطه منطقی میان داده‌ها را می‌یابد. در دهه اخیر، تحقیقات پایش آب زیرزمینی برای تکمیل یا حذف ایستگاه‌های پایش، به راهبردهای یادگیری ماشین[2] روی آورده‌اند. Asefa *et al.* (2004) روشی بر پایه ماشین بردار پشتیبان[3] (SVM) برای طراحی شبکه‌های پایش سطح آب زیرزمینی ارائه دادند. آن‌ها یک مدل بهینه‌سازی درجه دوم حل‌پذیر منحصر به فرد[4] را به کار بستند تا نه‌تنها خطای مربع متوسط اختلاف‌ها بین مقادیر سطح آب زیرزمینی محاسبه شده و پیش‌بینی شده، بلکه محدوده خطرپذیری نیز کمینه شود. مدل بهینه‌سازی، موقعیت‌های چاه‌ها را بر اساس اهمیت آن‌ها در تشریح سطح پتانسیل‌سنج[5] تعیین می‌کرد. از جمله نتایج ایشان در توصیف قابلیت روش پیشنهادیشان می‌توان به جای-گذاری چاه‌های پایش در موقعیت‌های با بیش‌ترین عدم قطعیت سطح آب زیرزمینی اشاره نمود. ماشین‌های بردار رابط[6] (RVM) که یک الگوریتم یادگیری آماری است در تحقیق Khader and McKee (2014) برای طراحی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی استفاده شد. روش پیشنهادی ایشان در آبخوانی در فلسطین به کار گرفته شد. در این پژوهش برای حذف عدم قطعیت‌ها در تخلیه، هدایت هیدرولیکی و فرآیندهای واکنش نیترات در مدل-سازی آب زیرزمینی از MCS بهره گرفته شد. تعداد چاه‌های پایش و موقعیت آن‌ها بر اساس نتایج اجراهای مدل RVM انتخاب شدند. هم‌چنین نتایج ۱۰۰ اجرای مختلف، پایداری مدل در انتخاب تعداد و موقعیت‌های چاه‌ها را نشان داد.

هدف اصلی تحقیق حاضر، ارائه یک روش قابل اعتماد و کارآمد بر پایه بهینه‌سازی برای طراحی بلندمدت شبکه پایش آب زیرزمینی است. در این تحقیق، شبکه پایش بهینه کمّی آب زیرزمینی با اهداف کاهش هزینه‌ها و افزایش دقت پایش سطح آب زیرزمینی طراحی می‌شود. فاصله چاه‌های مشاهداتی در شبکه پایش باید نه آن‌قدر زیاد باشد که شبکه با نقص اطّلاعات در مورد وضعیت آب زیرزمینی مواجه شود و نه آن‌قدر کم باشد که اطّلاعات مازاد به دست آید و هزینه‌ها افزایش یابند. بدین ترتیب دستورالعملی مبتنی بر تعداد و محل چاه‌های مشاهداتی (نماینده میزان هزینه پایش) و میزان دقت اطّلاعات به دست آمده (شامل وضعیت کمّی آبخوان) در دسترس خواهد بود.

مواد و روش‌ها

روش‌های برآورد سطح آب زیرزمینی

هنگامی که مقادیر یک متغیر برای مجموعه‌ای از نقاط نمونه در یک منطقه در دسترس باشند، می‌توان از روش‌های درون‌یابی فضایی[7] برای تعیین مقدار متغیر در هر نقطه دیگری استفاده کرد. درون‌یابی فضایی را می‌توان به روش‌های قطعی[8] (مثل IDW، اسپلاین‌ها و توابع پایه شعاعی[9]) و زمین‌آمار (مثل کریجینگ، مدل‌های مرتبه‌ای[10] و کاپیولا[11]) تقسیم نمود. روش اول برای محاسبه مقادیر از تابع ریاضی استفاده می‌کند و مقدار محاسبه شده یک عدد قطعی است. روش دوم از برآوردهای احتمالاتی مثل واریانس بهره می‌برد.

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

(رابطه ۱)

$$\hat{Z}(x_0)=\frac{\sum_{j:\|x_j-x_0\|\le h} w(x_j)Z(x_j)}{\sum_{j:\|x_j-x_0\|\le h} w(x_j)},\ w(x_j)=1/\|x_j-x_0\|^p$$

که در آن، $\hat{Z}(x_0)$ = مقدار مجهول در نقطه x_0، $Z(x_j)$ = اندازه‌گیری‌های در دسترس در نقاط x_j، $w(x_j)$ = وزن‌هایی که متناسب با فاصله بین x_0 و x_j هستند. معمولاً این وزن‌ها

1. Artificial Intelligence
2. Learning Machine
3. Support Vector Machine
4. Uniquely Solvable Quadratic Optimization Model
5. Potentiometric Surface
6. Relevance Vector Machines
7. Spatial Interpolation
8. Deterministic
9. Radial Basis Function
10. Hierarchical Model
11. Copula

به صورت تابع توانی فاصله اقلیدسی بین دو نقطه فضایی انتخاب می‌شوند ($\|x_j - x_0\|^{-p}$) پیشنهاد دادند Bivand *et al.*.(2008) که $p = 2$ استفاده شود.

کریجینگ - یکی از روش‌های اصلی زمین‌آمار کریجینگ نام دارد. انواع مختلف کریجینگ شامل ساده[1]، معمولی، جهانی[2]، رگرسیون[3]، کوکریجینگ[4] و ... می‌باشند که Cressie (1991) به تفصیل آن‌ها را معرفی نمود. فرآیند کریجینگ ساده شامل دو بخش اصلی است. بخش اول ساخت نیم‌تغییرنمای تجربی[5] است:

$$\gamma^*(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i+h)-Z(x_i)]^2 \quad \text{(رابطه ۲)}$$

که در آن، $\gamma^*(h)$ = مقدار تخمینی از نیم‌تغییرنما با تأخیر h، $N(h)$ = تعداد جفت‌های تجربی که با بردار h جدا شده‌اند، $Z(x_i)$ 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[6] یا غیرپارامتری[7] به آن برازش داده شود و از مدل‌های شاخص می‌توان به کروی، نمائی[8]، گوسین و خطی[9] اشاره نمود.

در گام بعدی، وزن‌های λ_j مربوط به رابطه درون‌یابی (۳) در روند حل کریجینگ توسط رابطه (۴) محاسبه می‌شوند.

$$\hat{Z}(x_0)=\sum_{j=1}^{J}\lambda_j Z(x_j) \quad \text{(رابطه ۳)}$$

$$\begin{cases}\sum_{j=1}^{N}\lambda_j(x_i,x_j)+\mu=\gamma(x_i,x_0)\\ \sum_{j=1}^{N}\lambda_j=1\end{cases} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

$$i=1,2,3,...,N$$

که در آن، λ_j = وزن‌های مربوط به نقاط x_j، μ = ضرایب لاگرانژ[10] و $\gamma(x_i,x_j)$ = نیم‌تغییرنمای بین دو نقطه x_i و x_j هستند.

تخمین کمینه خطای مربعات[11] که معرف دقت تخمین‌های کریجینگ است، به نام واریانس تخمین[12] یا واریانس کریجینگ شناخته می‌شود و به صورت زیر است:

$$\sigma_k^2(x_0)=\sum_{i=1}^{N}\lambda_i\gamma(x_i,x_0)+\mu \quad \text{(رابطه ۵)}$$

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

در این تحقیق از روش کریجینگ به عنوان روشی دقیق در تخمین مقادیر مجهول در نرم افزار ArcGIS برای برآورد سطح آب زیرزمینی و تهیه پایگاه داده بهره گرفته شده است. حجم محاسبات این روش بالاست و برای استفاده در الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی که شامل تکرارهای زیادی می‌باشد، تقریبا غیرممکن است. برای برآورد سطح آب زیرزمینی در طول بهینه‌سازی از روش قابل اعتماد IDW استفاده شده است. از مزایای IDW این است که به دلیل نداشتن پیچیدگی محاسباتی قابل کدگذاری در مدل بهینه‌سازی است و سرعت محاسبات بالایی دارد.

الگوریتم بهینه‌سازی

بهینه‌سازی رویه‌ای شامل مقایسه جواب‌ها با یکدیگر و انتخاب بهترین جواب موجه می‌باشد. جواب‌های مطلوب یا نامطلوب با توجه به توابع هدف مشخص می‌گردند. الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه[13] (MOEA) از روش‌های بهینه‌سازی تصادفی محسوب می‌شوند و فرآیند تکامل طبیعی را شبیه‌سازی می‌کنند. این الگوریتم‌ها با اجرای فرآیند جستجو در فضای تصمیم به مجموعه جواب‌های پرتو دست می‌یابند. NSGA-II از پرکاربردترین و قدرتمندترین الگوریتم‌های موجود در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است.

در NSGA-II، در گام اول جمعیت اولیه تولید می‌شود. سپس جمعیت بر اساس نامغلوبیت در هر جبهه مرتب می‌گردد. اولین جبهه در جمعیت فعلی مجموعه کاملاً نامغلوب است و جبهه دوم توسط افراد جبهه اول مغلوب می‌شوند و به همین ترتیب جبهه‌های بعدی مغلوب جبهه‌های جلویی هستند. هر فرد در هر جبهه رتبه‌بندی شده است. به افراد در جبهه اولی یک مقدار برازش از یک داده می‌شود و به افراد در جبهه دوم مقادیر برازش از دو تعلق می‌گیرد و الی آخر. اضافه بر مقدار برازش پارامتری جدید به نام فاصله ازدحام برای هر فرد محاسبه می‌شود. فاصله ازدحام سنجشی از چگونگی نزدیک بودن یک فرد به همسایگانش است. هر چه فاصله ازدحام میانگین بزرگ‌تر باشد تنوع در جمعیت بیش‌تر می‌گردد. والدها از جمعیت توسط انتخاب تورنومنت دو-دویی[14] طبق رتبه و فاصله ازدحام انتخاب

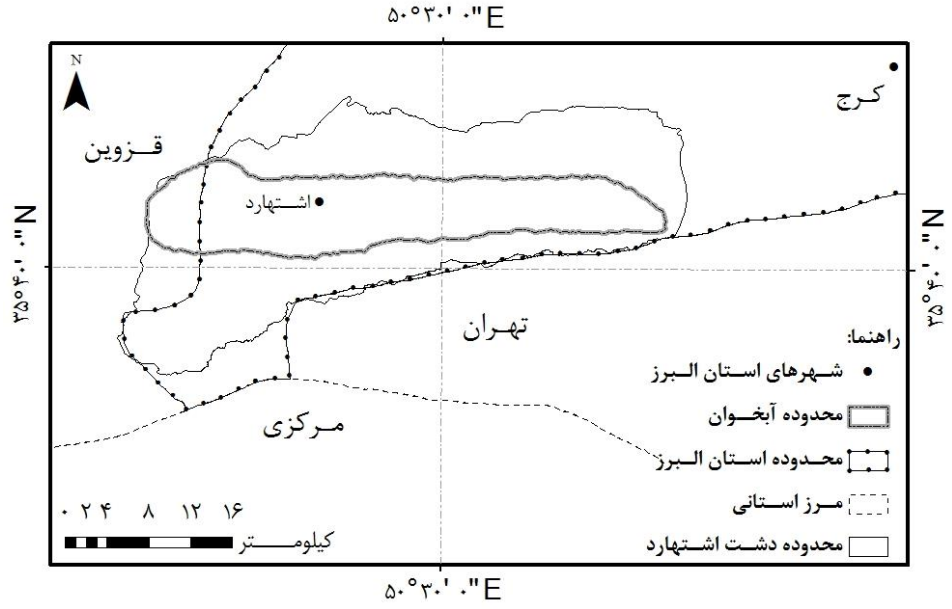
1. Simple
2. Universal
3. Regression
4. CoKriging
5. Experimental Semivariogram
6. Parametric
7. Nonparametric
8. Exponential Model
9. Linear Model
10. Lagrange Multiplier
11. Minimum Squared Error Estimation
12. Variance Estimation
13. Multi-Objective Evolutionary Algorithm
14. Binary tournament selection

می‌شوند. یک فرد با توجه به رتبه‌ای که کمتر از دیگری یا فاصله ازدحام بالاتر از دیگری باشد، برگزیده می‌شود. جمعیت منتخب، فرزندان را با عملگرهای تزویج و جهش تولید می‌کند. جمعیت فرزندان با جمعیت اصلی ادغام می‌شود و افراد این جمعیت‌ها دوباره براساس نامغلوبیت با جمعیت فعلی و فرزندان کنونی مرتب می‌شوند و فقط N تا از بهترین افراد انتخاب می‌شوند (N اندازه جمعیت است). افراد منتخب جمعیت نسل بعدی را تشکیل می‌دهند. این چرخه تا محقق شدن شرایط خاتمه تکرار خواهد شد. معیار توقف در الگوریتم NSGA-II می‌تواند رسیدن به حد بیشینه مجاز تعداد تکرارهای الگوریتم باشد.

مطالعه موردی

مطالعه موردی این تحقیق، آبخوان اشتهارد با وسعت ۲۳۵ کیلومترمربع است که حدود ۳۰ درصد از گستره دشت اشتهارد را در برمی‌گیرد. دشت اشتهارد از غرب به دشت قزوین و از شرق به دشت تهران-کرج محدود شده است. شبکه چاه‌های مشاهداتی موجود در دشت اشتهارد دارای ۲۴ حلقه چاه است (شکل ۲).

داده‌های موجود از مقادیر سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهداتی محدوده آبخوان باید مورد بررسی قرار گیرند و چاه‌های با داده‌های اشتباه یا ناقص حذف گردند. در مجموع از ۲۴ چاه مشاهداتی در محدوده آبخوان ۱۸ حلقه از چاه‌ها دارای آمار نسبتاً کامل از سطح آب زیرزمینی هستند. از این ۱۸ حلقه چاه مشاهداتی ۷ حلقه از سال ۸۸ احداث شدند و سایر چاه‌ها از سال ۸۱ دارای آمار هستند؛ بنابراین برای استفاده از آمار ۱۸ حلقه چاه مشاهداتی دوره مدل‌سازی از سال مهر ۸۸ تا مهر ۹۲ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیائی محدوده مطالعاتی دشت اشتهارد

روش تحقیق

برای طراحی کارآمد شبکه پایش و تعیین موقعیت بهینه چاه‌های مشاهداتی در محدوده مطالعاتی ابتدا، پایگاه داده‌ای از سطح آب زیرزمینی تهیه می‌شود. در گام بعدی به کمک ابزار بهینه‌سازی، طراحی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی انجام می‌شود. در این راستا تعریف توابع هدف و قیود و ارائه راه‌کار شبیه‌سازی مسئله ضروری است.

پایگاه داده: برای تهیه پایگاه داده از آمار موجود سطح آب زیرزمینی، برای برآورد سطح آب زیرزمینی در تمام محدوده آبخوان استفاده می‌شود. برای دست‌یابی به مقدار سطح آب زیرزمینی در تمام محدوده آبخوان از پرکاربردترین روش درون‌یابی فضایی به نام کریجینگ درون‌یابی به‌کار گرفته می‌شود. کریجینگ، سطح آب زیرزمینی را برای تمام نقاط پتانسیل در محدوده آبخوان محاسبه می‌کند و سطح آب در تمام محدوده به صورت گسسته و در نقاط با فاصله‌های مشخص برآورد می‌شود. در مسئله طراحی شبکه، این پایگاه داده به عنوان مقادیر مشاهداتی سطح آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود.

مدل بهینه‌سازی: برای مسئله بهینه‌سازی طراحی شبکه پایش، لازم است یک مدل طراحی شبکه پایش تعریف شود. دو تابع هدف مسئله عبارت‌اند از: (۱) کمینه کردن تعداد چاه‌های مشاهداتی در محدوده به عنوان نماینده هزینه‌های احداث،

نگهداری و قرائت سطح آب و (۲) کمینه نمودن *RMSE* بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در تمام نقاط پتانسیل محدوده آبخوان معرف دقت شبکه پایش. فرمول‌بندی این مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر است:

(رابطه ۶)
$$\begin{aligned} &\text{Minimize} && f_1 = \text{تعداد چاه‌ها} \\ &\textit{Minimize} && f_2 = RMSE \end{aligned}$$

(رابطه ۷)
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}(Hobs_i^t - Hest_i^t)^2}{TN}}$$

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

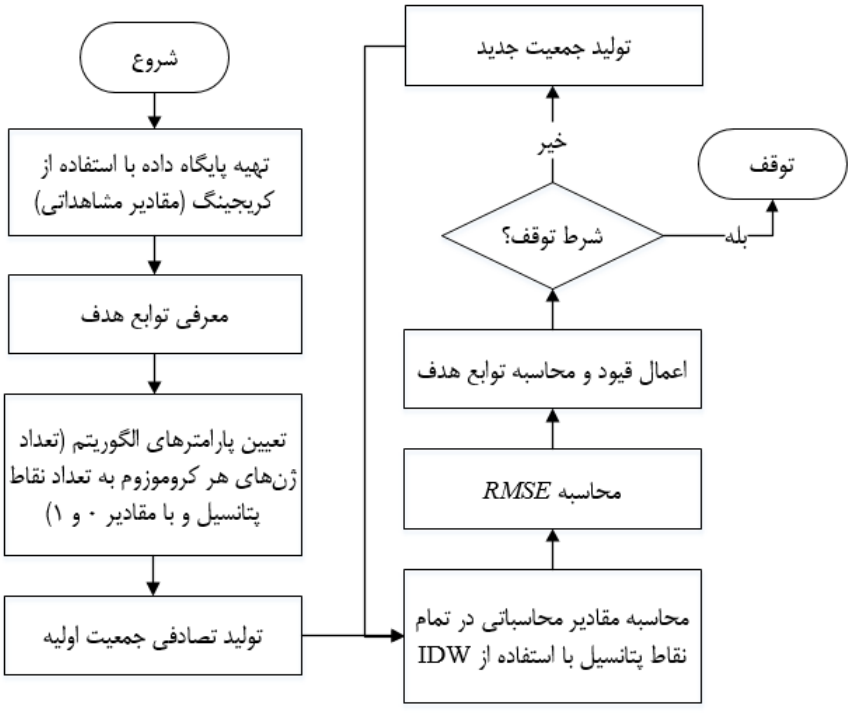
شبیه‌سازی: شبیه‌سازی شامل روابط حاکم بر مسئله می‌باشد. در مسئله بهینه‌سازی یکی از مهم‌ترین بخش‌ها، بخشی است که به بررسی قیود و محاسبه توابع هدف می‌پردازد. در شبیه‌سازی مسئله، ابتدا به کمک یک روش درون‌یابی ساده، قابل اعتماد، قابل کدگذاری و سریع که همان IDW است، مقادیر محاسباتی سطح آب زیرزمینی در تمام نقاط پتانسیل به دست می‌آید. سپس *RMSE* شبکه طبق رابطه ۷ با استفاده از مقادیر محاسباتی به دست آمده از IDW و مقادیر مشاهداتی نقاط پتانسیل موجود در پایگاه داده تعیین و به عنوان تابع هدف اول معرفی می‌شود. از طرفی تعداد چاه‌های شبکه نیز مشخص و به عنوان تابع هدف دوم مسئله تعریف می‌گردد.

الگوریتم بهینه‌سازی: NSGA-II برای حل مسئله بهینه‌سازی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی انتخاب 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 تحقیقات گذشته اثبات شده است.

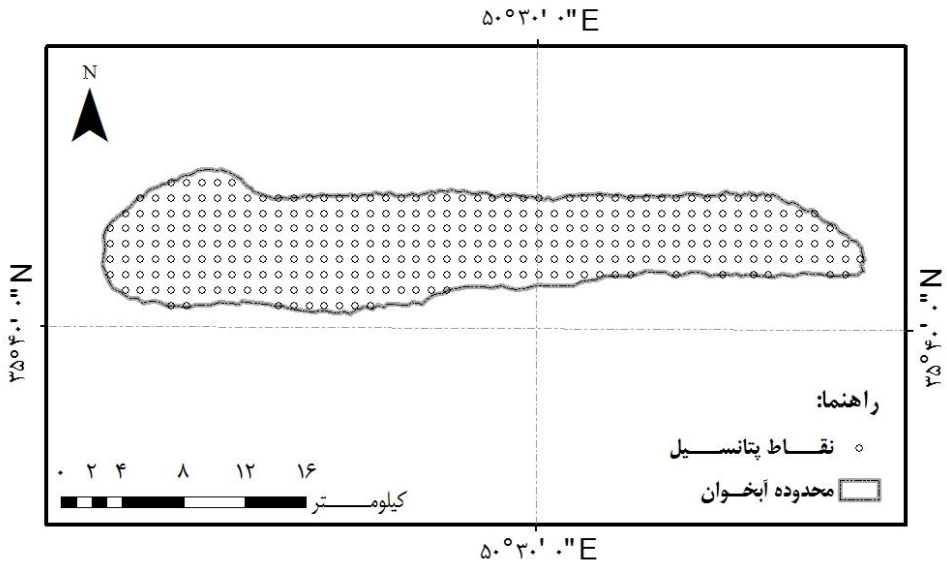
در تحقیق حاضر، به بازطراحی شبکه پایش آب زیرزمینی در منطقه مطالعاتی پرداخته می‌شود. در واقع هدف مسئله، تعیین بهترین موقعیت چاه‌های مشاهداتی در تمام گستره آبخوان است. در مسئله به ازای هر تعداد چاه مشاهداتی بهترین موقعیت چاه‌ها و *RMSE* شبکه به دست می‌آید. در شکل ۲ روند کلی روش تحقیق ارائه شده است.

نتایج و بحث

مجموعه‌ای از نقاط پتانسیل که تمام محدوده آبخوان را در بر می‌گیرند، به منظور ارزیابی منطقه جهت تعیین موقعیت چاه‌های مشاهداتی، تهیه گردید. به این صورت که شبکه‌ای منظم به ابعاد یک کیلومتر در یک کیلومتر در محدوده ایجاد شد و مرکز هر سلول یک نقطه پتانسیل چاه در نظر گرفته شد که تعداد این نقاط در منطقه مطالعاتی ۳۱۱ عدد بود (شکل ۳).

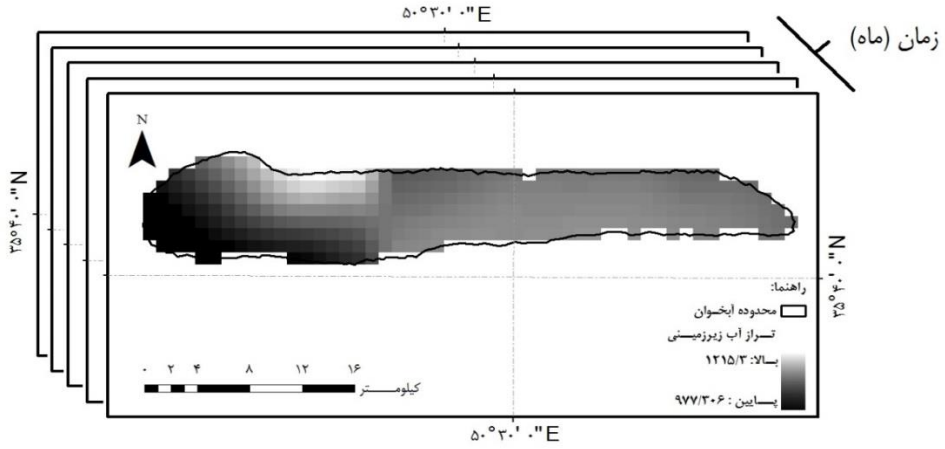


شکل ۲. روندنمای روش طراحی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی



شکل ۳. مجموعه نقاط پتانسیل در محدوده آبخوان

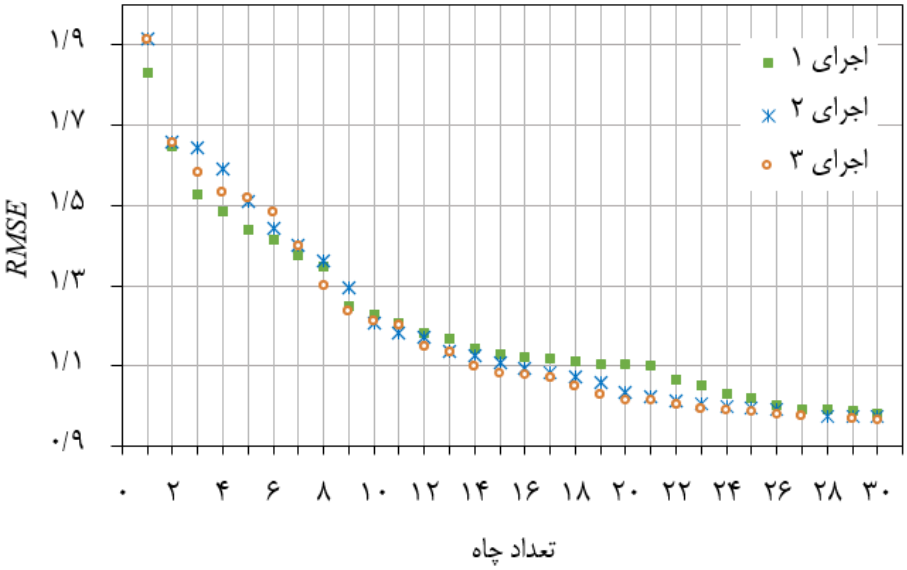
پایگاه داده سطح آب زیرزمینی آبخوان اشتهارد با بهره‌گیری از روش درون‌یابی کارآمد کریجینگ ایجاد شد. به این منظور، با استفاده از داده‌های سطح آب زیرزمینی ۱۸ حلقه چاه مشاهداتی برای چهار سال آبی، مقادیر سطح آب زیرزمینی برای نقاط پتانسیل محدوده ماه به ماه درون‌یابی شد (شکل ۴). هر نقطه پتانسیل دارای ۴۸ ماه آمار است که در مرحله بعد در بهینه‌سازی به کار برده می‌شود. به این ترتیب پایگاه داده سطح آب زیرزمینی به صورت یک ماتریس با ۳۱۱ سطر (نقاط پتانسیل) و ۴۸ ستون (ماه) آماده‌سازی می‌گردد.



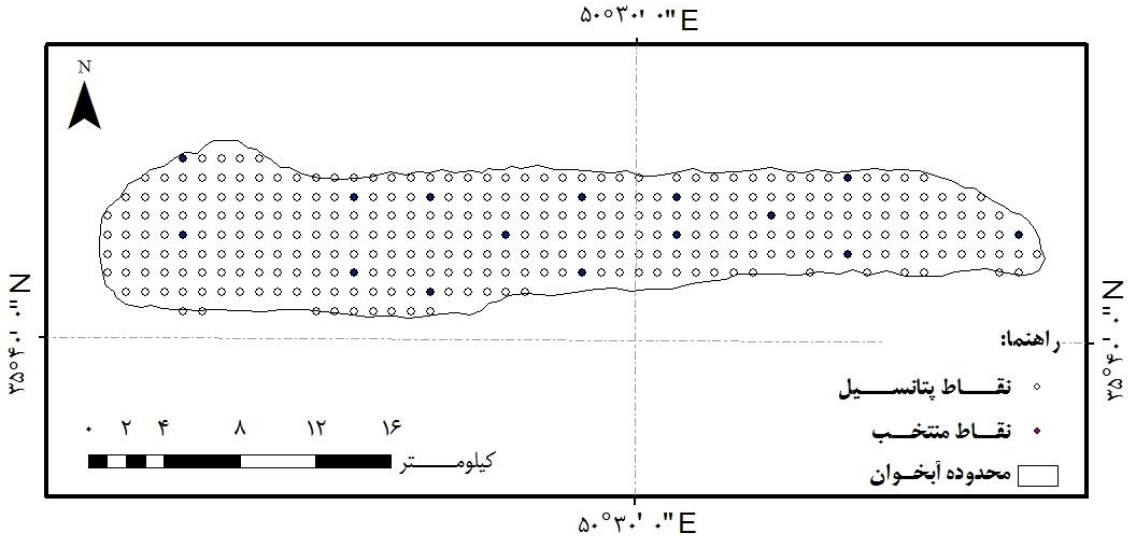
شکل ۴. نتایج حاصل از کریجینگ برای ۴۸ ماه

حل مسئله بهینه‌سازی دوهدفه طراحی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی با بهره‌گیری از الگوریتم پرقدرت NSGA-II انجام شد. پارامترهای در نظر گرفته شده در NSGA-II شامل تعداد تکرار، تعداد جمعیت، درصد تزویج و درصد جهش، به ترتیب مقادیر ۱۰۰۰، ۵۰، ۰/۷ و ۰/۲ می‌باشند. هم‌چنین بیشینه تعداد چاه‌های شبکه پایش ۳۰ چاه انتخاب شد تا فضای جستجوی بهینه‌سازی برای NSGA-II نامحدود نباشد و در بازه مشخصی به دنبال جواب‌های بهینه باشد. برای اطمینان از جواب مسئله به علت تصادفی بودن روند حل الگوریتم سه اجرا انجام گرفت. در بهینه‌سازی مسئله، با مشاهده جبهه‌های پرتو در شکل ۵ می‌توان دریافت که جواب‌های سه اجرا بسیار به یکدیگر نزدیک بودند و این نشانه قابل اعتماد بودن ابزار بهینه‌ساز است. جبهه‌های پرتو به دست آمده از پراکندگی مناسبی برخوردار بودند. هم‌چنین جبهه پرتوی به دست آمده توسط الگوریتم به ازای تمام تعداد چاه‌ها از ۱ تا ۳۰ حلقه چاه دارای مقدار *RMSE* بود.

شکل ۶ نمونه‌ای از بهینه‌سازی موقعیت چاه‌ها برای ۱۵ چاه را در اجرای اول نشان می‌دهد. علاوه بر مقادیر *RMSE* با مشاهده موقعیت چاه‌ها می‌توان دریافت که چاه‌ها از توزیع مناسبی برخوردارند و تمام گستره آبخوان را پوشش دادند.



شکل ۵. جبهه‌های پرتوی طراحی شبکه پایش برای سه اجرای مختلف



شکل ۶. چاه‌های منتخب شبکه پایش برای ۱۵ حلقه چاه

نتیجه‌گیری

شبکه پایش کمّی آب زیرزمینی نقش ویژه‌ای در مطالعات آب زیرزمینی و پیش‌بینی رفتار آینده جریان آب زیرزمینی در آبخوان ایفا می‌کند؛ بنابراین در این تحقیق سعی شده است با ارائه یک روش بهینه‌ساز یک شبکه پایش سطح آب زیرزمینی طراحی گردد. طراحی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی با در نظر گرفتن 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 مسئله از الگوریتم قدرتمند و پرکاربرد NSGA-II استفاده شد و برای محاسبه مقادیر محاسباتی سطح آب زیرزمینی در شبیه‌ساز از درون‌یابی IDW بهره گرفته شد.

در این تحقیق مشاهده شد که می‌توان به کمک روشی مبنی بر بهینه‌سازی یک شبکه پایش سطح آب زیرزمینی طراحی گردد. در نهایت جواب مسئله به صورت یک جبهه پرتو به دست آمد که می‌توان با تعیین دقت مورد نیاز از داده‌برداری در شبکه پایش سطح آب زیرزمینی، تعداد چاه‌های مشاهداتی و بهترین موقعیت چاه‌ها را در منطقه مشخص نمود.

REFERENCES

Asefa, T., Kemblowski, M.W., Urroz, G., McKee, M., and Khalil, A. (2004). "Support vectors-based groundwater head observation networks design", Water Resources Research, 40(11), DOI: 10.1029/2004WR003304.

Barca, E., Passarella, G., Vurro, M., and Morea, A. (2015). "MSANOS: Data-Driven, Multi-Approach Software for Optimal Redesign of Environmental Monitoring Networks", *Water Resources Management*, 29(2), 619-644.

Bivand, R.S., Pebesma, E., and Gómez-Rubio, V. (2008). "Applied spatial data analysis with R", Springer, New York.

Cressie, N.A.C. (1991). "Statistics for spatial data", John Wiley & Sons.

Datta, B. and Dhiman, D.S. (1996). "Chance-constrained optimal monitoring network design for pollutants in groundwater", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(3), 180-188.

Dhar, A. and Patil, R.S. (2012). "Multiobjective design of groundwater monitoring network under epistemic uncertainty", *Water Resources Management*, 26(7), 1809-1825.

Dokou, Z. and Pinder, G. (2009). "Optimal search strategy for the definition of a DNAPL source", Journal of Hydrology, 376(3-4), 542-556.

Esquivel, J.M., Morales, G.P., and Esteller, M.V. (2015). "Groundwater monitoring network design using GIS and multicriteria analysis", *Water Resources Management*, 29(9), 3175-3194.

Hudak, P.F. and Loaiciga, H.A. (1993). "An optimization method for monitoring network design in multilayered groundwater flow systems", *Water Resources Research*, 29(8), 2835-2845.

Hudak, P. (2006). "Heuristic for constructing minimum-well groundwater monitoring configurations at waste storage facilities", *Environmental Science and Health*, 41(2), 185-193.

Khader, A.I. and McKee, M. (2014). "Use of a relevance vector machine for groundwater quality monitoring network design under uncertainty", *Environmental Modelling and Software*, 57, 115-126.

Loaiciga, H., Charbeneau, R.J., Everett, L.G., Fogg, G.E., Hobbs, B.F., and Rouhani, S. (1992). "Review of ground-water quality monitoring network design", *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(1), 11-37.

Mogheir, Y., de Lima, J.L.M.P., and Singh, V.P. (2003). "Assessment of spatial structure of groundwater quality variables based on the entropy theory", *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(5), 707-721.

Wilson, C., Einberger, C., Jackson, R., and Mercer, R. (1992). "Design of ground-water monitoring networks using the monitoring efficiency model (MEMO)", *Ground Water*, 30(6), 965-970.

Wu, J., Zheng, C., Chien, C.C., and Zheng, L. (2006). "A comparative study of Monte Carlo simple genetic algorithm and noisy genetic algorithm for cost-effective sampling network design under uncertainty", *Advances in Water Resources*, 29(6), 899-911.

Yang, F., Cao, S., Liu, X., and Yang, K. (2008). "Design of groundwater level monitoring network with ordinary kriging", *Journal of Hydrodynamic*, 20(3), 339-346.