

بهینه‌سازی تعداد چاه‌های پایش سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش برخورد اجسام (مطالعه موردی: آبخوان دشت اراک)

نوید هوشنگی^{*}، وحیدرضا مهدوی^۲، میر رضا غفاری رزین^۱

^۱ استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده مهندسی علوم زمین - دانشگاه صنعتی اراک
{hooshangi, mr.ghafari}@arakut.ac.ir

^۲ استادیار گروه مهندسی ژئومکانیک - دانشکده مهندسی علوم زمین - دانشگاه صنعتی اراک
v.r.mahdavi@arakut.ac.ir

(تاریخ دریافت فروردین ۱۴۰۰، تاریخ تصویب آبان ۱۴۰۰)

چکیده

داده‌ها در مطالعات جغرافیایی عموماً به صورت نقطه‌ای در ایستگاه‌های پایش اندازه‌گیری شده و نقش مهمی در تحلیل تغییرات زمانی و مکانی پدیده‌ها دارند. بهینه‌سازی تعداد چاه‌های شبکه‌ی پایش یکی از مسائل اصلی در کاهش هزینه و افزایش کیفیت داده‌های استخراج‌شده می‌باشد. هدف اصلی این تحقیق بهینه‌سازی شبکه‌ی پایش آب زیرزمینی آبخوان دشت اراک می‌باشد. در این تحقیق از روش نوین فراکاوشی برخورد اجسام (CBO) برای اولین بار در حل مسائل مکانی استفاده می‌شود. بدین منظور ابتدا داده‌های چاه‌های آب زیرزمینی جمع‌آوری و پالایش‌شده و در ادامه روش CBO با استفاده از روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) برای محاسبه‌ی تابع هزینه پیاده‌سازی شد. به منظور ارزیابی دقت خروجی، نتایج آن با روش کلونی مورچه (ACO) مقایسه شد. با جمع‌آوری و پالایش ۵۷ داده‌ی چاه‌های آبخوان اراک، منحنی تعداد چاه‌های حذف‌شده در مقابل مقدار خطای ایجادشده در چاه‌ها ترسیم شد. مقایسه درصد خطای بهینه‌شده نشان می‌دهد که روش CBO همواره مقدار کمتری نسبت به ACO دارد. با لحاظ نمودار ترسیم‌شده، موقعیت مکانی چاه‌های حذف‌شده در سناریوهای مختلف و نظرات کارشناسی مشخص شد که با حذف ۶ چاه از شبکه‌ی پایش آب زیرزمینی آبخوان اراک حداکثر ۳۵ سانتی‌متر خطا در تخمین سطح آب در چاه‌ها وارد می‌شود. موقعیت مکانی چاه‌های حذف‌شده نشان می‌دهد که چاه‌های اطراف تالاب میقان از اهمیت بالایی در تخمین سطح آب زیرزمینی آبخوان دارند و اکثر چاه‌های حذف‌شده در بخش شمالی و مرکزی آبخوان قرار دارند. همچنین این مطالعه نشان داد که روش بهینه‌سازی برخورد اجسام روشی مناسب در بهینه‌سازی شبکه‌های پایش آب زیرزمینی به منظور کاهش هزینه و زمان برداشت اطلاعات می‌باشد.

واژگان کلیدی: شبکه پایش، آب زیرزمینی، روش بهینه‌سازی اجسام، روش فراکاوشی، وزن دهی معکوس فاصله

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

آب‌های زیرزمینی یکی از حیاتی‌ترین منابع طبیعی هستند که هسته‌ی سیستم محیط زیستی را تشکیل می‌دهند [۱]. اندازه‌گیری و پایش سطح تراز آب زیرزمینی یکی از گام‌های اساسی و ضروری در مطالعات آب‌های زیرزمینی محسوب می‌شود [۲]. برای محافظت از منابع آب زیرزمینی نیاز به استخراج داده‌های قابل اعتماد در قالب یک شبکه پایش می‌باشد، که اساس و پایه درک ویژگی‌های هیدرولوژیکی منطقه و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی است [۳]. شبکه پایش آب زیرزمینی یکی از مؤلفه‌های مهم زیرساختی شهرهای هوشمند محسوب شده و طراحی بهینه آن‌ها ضرورت جامعه جهانی می‌باشد [۱].

تعداد و توزیع مکانی چاه‌های مشاهداتی در یک شبکه‌ی پایش، از پارامترهای مهم و مؤثر در نتایج مطالعات آب‌های زیرزمینی می‌باشند [۵، ۶]. بعد از طراحی اولیه‌ی شبکه‌ی پایش، همواره نیاز به اصلاح و بررسی داده‌ها و به‌روزرسانی و بهینه‌سازی شبکه وجود دارد [۷]. طراحی و بهینه‌سازی شبکه‌ی پایش نقش مهمی در بررسی دقیق تغییرات سطح ایستابی [۸]، تعیین ایستگاه‌های نمونه‌برداری شاخص [۹]، بررسی تغییرات زمانی غلظت آلاینده‌ها [۵] و بررسی عملکرد عملیات پاک‌سازی [۱۰] داشته و خروجی آن در مطالعات پتانسیل منابع آب [۱۱]، مدیریت کمی و کیفی منابع آب و تعیین وضعیت آبخوان‌ها دارد [۴]. بهینه‌سازی شبکه‌ی پایش با تعیین چاه‌های پراهمیت موجب افزایش دقت اندازه‌گیری در ایستگاه‌های تعیین شده می‌شود و قابلیت اطمینان به سطح را افزایش می‌دهد [۸]. بهینه‌سازی شبکه پایش ضمن کاهش هزینه‌های مربوط به ایجاد، نگهداری و نمونه‌برداری از شبکه، به دقت سطح برآورد شده کمک می‌کند [۱۲، ۱۳].

دشت اراک در حوزه آبخیز تالاب کویری میقان واقع شده و قابلیت زیادی در بخش کشاورزی و صنعت دارد [۱۴]. سطح آبخوان شهر اراک در طول سالین اخیر همواره رو به کاهش بوده و این افت سطح آب زیرزمینی نگران کننده است [۱۵]. در این منطقه به سبب برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، منابع آب سطحی و رودخانه‌ها هم بیشتر خشک و با کاهش آورد روبرو هستند. پایش مستمر و دقیق سطح آب زیرزمینی در این استان و به ویژه آبخوان اراک از نیازهای اصلی آن به شمار می‌رود.

بهینه‌سازی شبکه‌ی پایش به منظور ایجاد بهترین ترکیب در بین ایستگاه‌های موجود بر اساس اهداف از پیش تعیین شده انجام می‌گردد که در نهایت منجر به حداقل شدن تعداد چاه‌های پایش با توزیع مکانی بهینه و مناسب از نظر اقتصادی می‌شود [۷، ۱۲]. متناسب با هدف طراحی شبکه پایش، محدودیت‌های مختلفی از جمله منابع مالی [۲]، در دسترس بودن داده‌ها و مکان‌های اندازه‌گیری، رویکردهای اجتماعی [۱۱]، فن‌آوری‌های نظارت و ملاحظات اداری و حقوقی وجود دارد [۱]. بهینه‌سازی شبکه‌های پایش با روش‌های مختلفی در پدیده‌های متفاوتی انجام شده است [۸، ۱۳]. در بهینه‌سازی شبکه پایش آب زیرزمینی از روش آنتروپی در تلفیق با کریجینگ بیزین تجربی [۱۶]، از تلفیق روش شبکه عصبی با آنتروپی و روش‌های زمین‌آماري [۹]، از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و کریجینگ [۷]، رویکرد جک نایف (حذف یک‌به‌یک داده‌ها بر اساس دقت روش درون‌یابی) [۸]، روش احتمال پذیرش (مبتنی بر مدل زمین‌آماري کریجینگ و تابع توزیع احتمال نرمال) [۱۳]، روش زمین‌آماري کریجینگ و خطای برآورد پهنه [۱۴] استفاده شده است. در بهینه‌سازی شبکه پایش کیفیت آب زیرزمینی و سطحی نیز به وفور از روش کریجینگ و خطای برآورد [۱۲]، آنتروپی [۱۷] و آنالیز مولفه‌های اصلی^۱ (PCA) [۱۸] استفاده شده است. بهینه‌سازی شبکه‌ی پایش در علوم دیگری از جمله بهینه‌سازی شبکه باران‌سنجی [۵]، سنجش آلودگی هوا و هواشناسی [۱۹] و در علوم نوینی چون تزریق کربن دی‌اکسید به زمین [۲۰] و جایابی سنسورهای گلخانه‌ها [۲۱] و غیره مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

هر کدام از روش‌های استفاده شده مزایا و معایبی دارند و روش غالبی برای انتخاب ایستگاه‌های شاخص و بهینه‌سازی شبکه‌ی پایش وجود ندارد. چرا که موارد مهمی از جمله اهداف، مقیاس، تعداد داده‌ها، ویژگی‌های اکولوژیکی منطقه و غیره در انتخاب روش مهم می‌باشند [۷، ۱۷، ۲۱]. عموماً روش مورد استفاده و تعداد مناسب ایستگاه‌ها با توجه به هدف، الزامات و اطلاعات موجود انتخاب می‌شود [۱، ۶]. روش‌هایی که مبتنی بر تحلیل‌های آماری و آنتروپی هستند بر اساس داده‌های برداشت شده در زمان‌های مختلف و بدون توجه به موقعیت مکانی داده‌ها عمل می‌کنند [۱۴].

^۱ Principal Component Analysis

نیز در تحقیقات مختلفی بررسی شده است. هوشنگی (۱۳۹۸) از الگوریتم کلونی مورچگان برای بهینه‌سازی شبکه-ی پیش آب زیرزمینی دشت تبریز [۲۲]، Yuanhai و Hilton (۲۰۰۷) در بهینه‌سازی شبکه‌ی پیش آبخوان فوقانی شهر پیرس در واشنگتن، Moeinia و Afshar (۲۰۱۷) برای طراحی بهینه‌ی شبکه‌های فاضلاب گرانشی در محیط آزمایشگاهی استفاده کرده‌اند. مقایسه‌ی روش‌های بهینه‌سازی فراکوشی در تحقیقات معدودی لحاظ شده است. جعفر زاده و خاشعی سیوکی (۱۳۹۶) به مقایسه‌ی شبکه‌ی عصبی و جست‌وجوی گرگ خاکستری پرداختند. در مراحل پیاده‌سازی از داده‌های کمکی سطح آب زیرزمینی با تأخیرهای ۱ تا ۲ ماهه، ارتفاع توپوگرافی، تخلیه از آبخوان و مختصات به عنوان ورودی تخمین‌گر سطح آب زیرزمینی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان از برتری روش گرگ خاکستری بود. به طور کلی بهینه‌سازی شبکه‌های پیش آب این هدف که نمونه‌های برداشت شده معرف کل داده‌ها باشد، انجام می‌شود [۱۰، ۱۳]، لذا در اکثر مطالعات انجام شده توابع هدف استفاده شده در انتخاب چاه‌های نمونه با محاسبه‌ی خطای روش‌های درون‌یابی تعیین شده‌اند [۱۰].

بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که مطالعات زیادی بر روی عملکرد الگوریتم‌های جدید فراکوشی در مقوله‌ی بهینه‌سازی ایستگاه‌های پیش انجام نشده است [۴]. در مطالعات انجام شده نیز قابلیت روش‌های فراکوشی استفاده شده تایید شده است. بررسی روش‌های جدید و مقایسه‌ی آن با روش‌های قبلی می‌تواند منجر به روش‌های بهینه‌ی نوین شود. لذا هدف اصلی این تحقیق بهینه‌سازی شبکه پیش آب زیرزمینی آبخوان اراک می‌باشد که از الگوریتم فراکوشی جدید با نام بهینه‌سازی برخورد اجسام^۵ (CBO) استفاده می‌شود. در این مطالعه تعریف تابع هزینه در روش برخورد اجسام با روش درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) انجام می‌گردد. به منظور ارزیابی دقت روش CBO در قیاس با سایر روش‌های موجود، قابلیت این روش با کلونی مورچه بررسی می‌شود. نوآوری اصلی این تحقیق استفاده از روش نوین بهینه‌سازی برخورد اجسام برای اولین بار در حل مسائل مکانی می‌باشد. این روش در سال ۲۰۱۴ توسط کاوه و مهدوی [۲۵] ارائه شده و با توجه به ماهیت آن به نظر می‌رسد استفاده از این روش بهینه‌سازی در

لذا این روش‌ها نمی‌توانند صرفاً با یک سری از داده به بهینه‌سازی شبکه پیش بردازند [۵] و در خروجی نهایی آن‌ها موقعیت مکانی داده‌ها لحاظ نشده است. در مقابل روش‌های زمین‌آماری با لحاظ موقعیت و مختصات ایستگاه-های نمونه‌گیری، بهینه‌سازی را انجام داده و صرفاً با یکسری از داده‌ها کار می‌کنند. این روش‌ها حجم محاسبات بالایی دارند و شرط لازم برای استفاده از آن‌ها برقراری قانون اول جغرافیا می‌باشد [۱۳]. در این میان مدل‌های هوشمندی چون شبکه‌ی عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان و روش‌های بهینه‌سازی فراکوشی قرار دارند که به دلیل سرعت پردازش، قابلیت پیاده‌سازی با تعداد مختلفی از داده‌ها و دقت بالاتر نسبت به روش‌های دیگر توسعه‌ی بیشتری یافته‌اند [۱۶].

روش‌های بهینه‌سازی فراکوشی و تکاملی از ابزارهای پرستفاده در بهینه‌سازی شبکه‌های پیش می‌باشند [۳، ۴، ۷، ۱۱]. جنت‌رستمی و صلاحی (۱۳۹۸) با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی شبکه‌ی پیش دشت گیلان پرداختند. آن‌ها توزیع مکانی مناسب برای پارامتر EC^۱ را به-عنوان پارامتر کیفی در طراحی شبکه پیش لحاظ کردند. به منظور تابع بهینه‌سازی نیز از مدل نش-ساتکلیف جهت تطابق بین دو شبکه‌ی پیش موجود و شبکه‌ی جدید استفاده کردند. از الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب^۲ (NSGA-II) نیز در منطقه‌ی کوه‌دشت جهت بازطراحی شبکه‌ی پیش آب زیرزمینی استفاده شده است. تابع بهینه شونده در آن با استفاده از روش درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله^۳ (IDW) ایجاد شد تا کمترین خطای اندازه‌گیری و فقدان داده و بهترین پراکنش داده‌ها تأمین شود [۲]. رئیسی عیسی آبادی و همکاران (۱۳۹۷) از الگوریتم فراکوشی تابو در دشت دزفول-اندیمشک استفاده کردند. آن‌ها واریانس خطای درون‌یابی محاسبه‌شده در روش کریجینگ را بهینه کردند. Pérez و همکاران (۲۰۱۷) از الگوریتم کلونی زنبورعسل در بهینه‌سازی شبکه‌ی پیش آب رودخانه در استان کیپ شرقی^۴ آفریقای جنوبی با هدف افزایش سرعت تشخیص آلودگی و افزایش قابلیت اطمینان به داده‌ها استفاده کردند. قابلیت کلونی مورچگان در زمینه‌ی بهینه‌سازی شبکه پیش

^۱ Electrical Conductivity

^۲ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

^۳ Inverse Distance Weighting

^۴ Eastern Cape

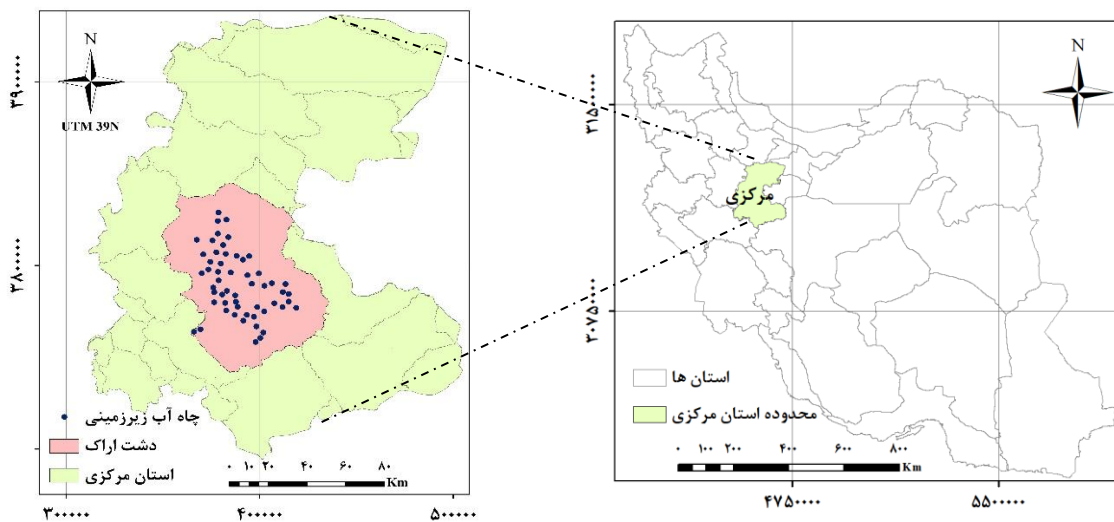
^۵ Colliding Bodies Optimization

مسائل مربوط به علوم مکانی تا حد زیادی می‌تواند به سرعت و دقت بهینه‌سازی کمک کند.

۲- منطقه مورد مطالعه

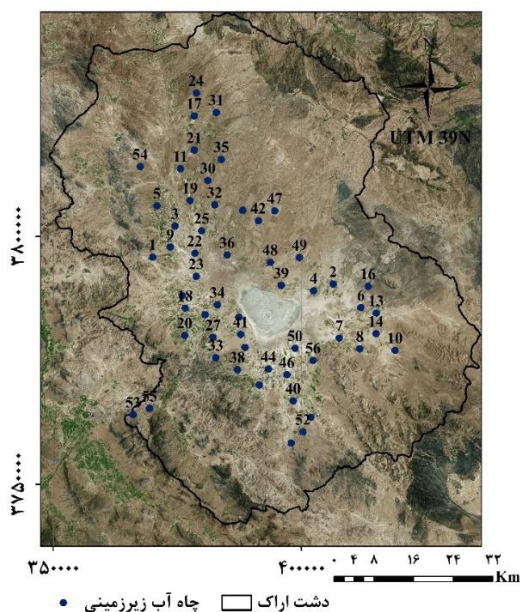
آبخوان اراک از نوع نامحصور با مساحت تقریبی ۱۹۴۶ کیلومترمربع بوده (شکل ۱) و در حدود ۱۴۵۸ چاه عمیق و ۱۵۵۴ چاه نیمه عمیق در دشت اراک قرار دارد [۱۴]. دشت‌های اصلی استان مرکزی ۱۵ دشت بوده که از این تعداد ۱۰ دشت ممنوعه و ۵ دشت ممنوعه بحرانی هستند. متوسط کسری مخزن سالیانه دشت‌های استان برابر ۲۵۰ میلیون مترمکعب در سال و کسری مخزن تجمعی درازمدت حدود ۵ میلیارد مترمکعب است. تغذیه آبخوان اراک به

علت نامحصور بودن و میزان بارش، از آبخوان‌های مجاور بیشتر می‌باشد که باعث افت کمتر سطح آب زیرزمینی در آبخوان اراک شده است [۱۵]. میانگین بارش متوسط استان حدود ۲۶۰ میلی‌متر در سال است. بیش از ۹۰ درصد منابع آب استان در بخش کشاورزی مصرف می‌شود [۲۶]. در راستای بهبود وضعیت منابع آب زیرزمینی استان طرح‌های مختلفی شامل پر و مسلوب‌المنفعه کردن چاه‌های غیرمجاز، تشکیل گروه‌های گشت و بازرسی، نصب کنتور بر روی چاه‌ها، توجه به تحویل حجمی آب در بخش آب‌های سطحی و زیرزمینی، تأمین آب شرب از آب‌های سطحی و غیره انجام شده است، اما همچنان مدیریت منابع آب زیرزمینی از دغدغه‌های اصلی استان می‌باشد [۲۶].



(ب)

(الف)



(ج)

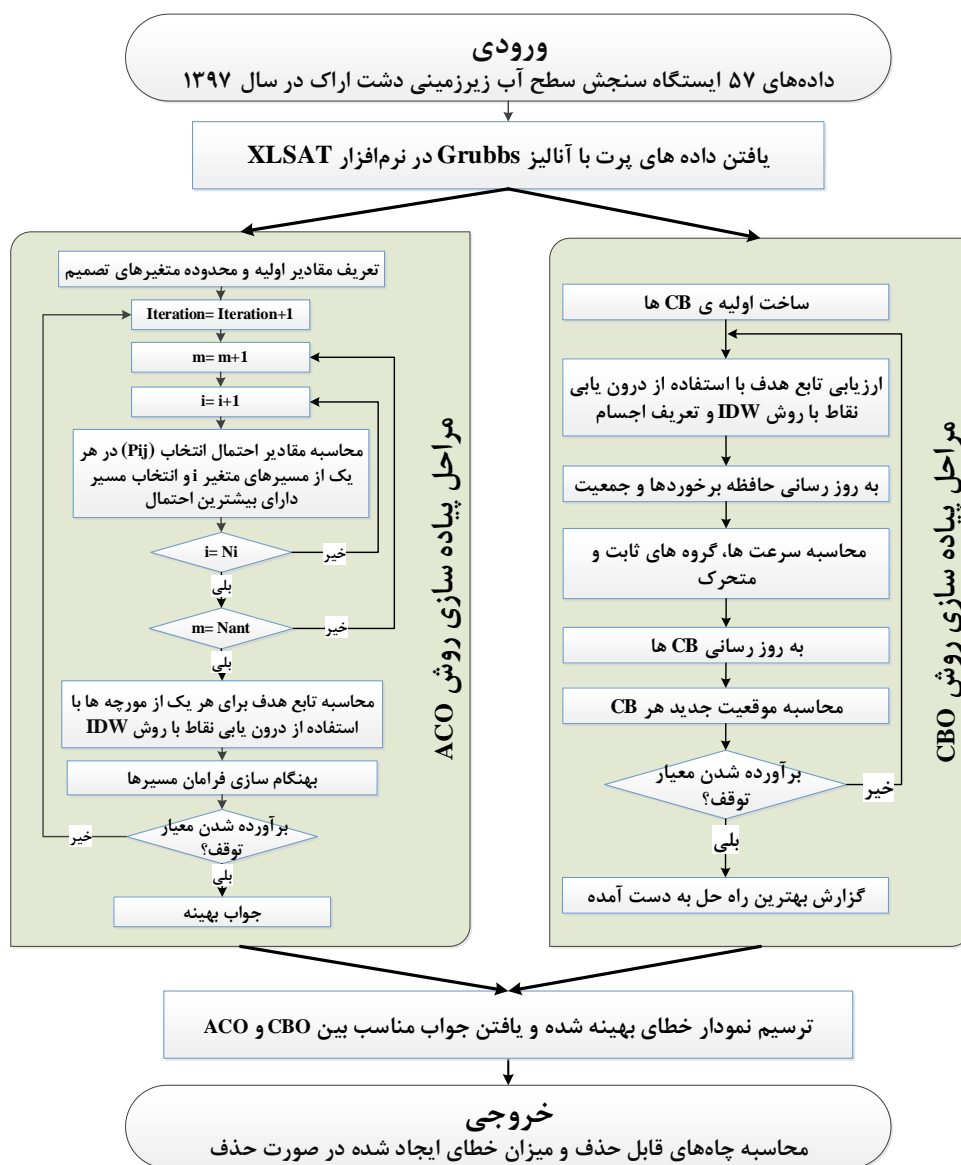
شکل ۱- منطقه مطالعاتی: الف) محدوده استان مرکزی، ب) محدوده آبخوان دشت اراک و سایر آبخوان‌های استان مرکزی، ج) موقعیت و شماره‌ی چاه‌های پیژومتری

می‌شوند. در مجموعه‌ی ایستگاه‌های انتخاب شده (ایستگاه‌های بااهمیت)، ایستگاه‌هایی قرار دارد که ارزش و سهم بالاتری در سنجش تخمین سطح پیوسته آب زیرزمینی ایجاد شده دارند. در مقابل، ایستگاه‌های انتخاب نشده (نقاط کم‌اهمیت) قرار دارند که فرض می‌شود در آینده برداشت اطلاعات در این ایستگاه‌ها انجام نخواهد شد. برای یافتن مجموعه‌ی بهینه برای ایستگاه‌های انتخاب شده و انتخاب نشده، بر اساس مجموعه‌ی ایستگاه‌های انتخاب شده مقدار ایستگاه‌های انتخاب نشده را برآورد می‌کنیم. هر چه اختلاف مقادیر محاسبه شده با مقادیر واقعی در ایستگاه‌های انتخاب نشده کمتر باشد، نشان‌دهنده‌ی بارزش بودن چاه‌های انتخاب شده می‌باشد. روندنمای تحقیق در شکل ۲ نمایش داده شده است.

در این تحقیق از داده‌های متوسط سالیانه ۵۷ ایستگاه سنجش سطح آب زیرزمینی در سال ۱۳۹۷ استفاده می‌شود. داده‌های این تحقیق از شرکت مدیریت منابع آب ایران دفتر مطالعات پایه منابع آب دریافت شد. موقعیت و شماره‌ی ایستگاه‌های پایش آبخوان اراک در شکل ۱-ج نمایش داده شده است. از میان ۵۷ ایستگاه پایش در سال ۱۳۹۷ تنها ۴۳ ایستگاه فعال بوده و در ۱۴ ایستگاه، اندازه‌گیری ثبت نشده بود.

۳- مواد روش‌ها

به منظور بهینه‌سازی شبکه پایش، ایستگاه‌های موجود در شبکه به دو دسته‌ی ایستگاه‌های انتخاب شده برای شبکه پایش آینده و ایستگاه‌های انتخاب نشده تقسیم



شکل ۲- روندنمای تحقیق

که x_i^{old} و x_i^{new} به ترتیب موقعیت جدید و قدیم ذره λ ام، v_i سرعت ذره λ ام و $rand$ یک عدد تصادفی در بازه $[-1,1]$ می‌باشد.

در نتیجه اجسام با موقعیت خوب، که دارای جرم بیشتری هستند، کمتر جابجا می‌شوند و بالعکس. همچنین از یک ضریب ارتجاعی بین دو جسم برای تنظیم کردن جستجوی کلی و محلی استفاده می‌شود. از جمله خصوصیات این الگوریتم می‌توان به سادگی فرمول‌بندی آن، عدم نیاز به تنظیم کردن پارامترهای داخلی و عدم استفاده از حافظه برای ذخیره اطلاعات قبلی در فرمول‌بندی آن، اشاره کرد [۲۷].

۳-۲- روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)

در رویکرد پیشنهادی برای بهینه‌سازی شبکه‌ی پیش، از روش IDW برای ایجاد سطح پیوسته از ایستگاه‌های انتخاب شده و برآورد مقدار ایستگاه‌های انتخاب نشده استفاده می‌شود. IDW یکی از روش‌های ساده‌ی درون‌یابی فضایی به شمار می‌رود که در بهینه‌سازی شبکه پیش استفاده شده است [۲]. در روش IDW مقدار کمیت مجهول در یک نقطه به عنوان میانگین وزنی از سایر نقاط موجود در همسایگی نقطه که اندازه‌گیری شده‌اند محاسبه می‌شود [۸]. در این روش وزن‌ها با توجه به فاصله‌ی نقطه‌ی مجهول از نقاط معلوم، بدون توجه به نحوه‌ی پراکندگی نقاط حول نقطه مورد نظر تعیین می‌شود [۲۸]. فرمول این روش همانند رابطه ۳ می‌باشد:

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i z_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3)$$

$$w_i = \frac{1}{d^m}$$

در فرمول فوق z_i مقدار مشاهداتی، w_i وزن مقادیر و m توان استفاده شده در محاسبه وزن می‌باشد. هرچه توان افزایش یابد، بدین معنی است که وزن داده‌ی استفاده شده کمتر می‌شود. لذا نقش داده‌های دورتر در تخمین پارامتر مجهول کاهش می‌یابد. در این روش اعداد به‌دست‌آمده محدود به دامنه‌ی اعداد موجود می‌باشد. از روش‌های درون‌یابی مانند کریجینگ و روش IDW به‌وفور در درون‌یابی داده‌های سطح آب زیرزمینی استفاده شده است [۸، ۱۶]. در روش IDW در قیاس با کریجینگ هیچ

برای بهینه‌سازی شبکه پیش آبخوان دشت اراک با استفاده از رویکرد فوق، ابتدا داده‌های سطح آب زیرزمینی آبخوان جمع‌آوری و داده‌های پرت با استفاده از آنالیز Grubbs در نرم‌افزار XLSAT بررسی شدند. سپس روش فراکاوشی برخورد اجسام پیاده‌سازی شده و از روش درون‌یابی IDW در ایجاد سطح پیوسته از چاه‌های انتخاب شده استفاده می‌شود. مقدار خطا در ایستگاه‌های انتخاب نشده و میزان کاهش دقت کل نیز با استفاده از فرمول خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) محاسبه می‌شود.

۳-۱- روش فراکاوشی برخورد اجسام در بهینه‌سازی

در این تحقیق از روش برخورد اجسام برای انتخاب بهینه‌ی مجموعه‌ی ایستگاه‌های با اهمیت استفاده می‌شود. برخورد اجسام، یک روش بهینه‌یابی فراکاوشی است که در سال ۲۰۱۴ توسط کاوه و مهدوی ارائه شد [۲۷، ۲۵]. فلسفه الگوریتم بهینه‌سازی برخورد اجسام^۱ (CBO) بر پایه شبیه‌سازی فضای جستجوی الگوریتم با محیطی است که در آن انرژی جنبشی و تکانه ذرات در حال برخورد در حال کاهش است، استوار می‌باشد. فرمول‌بندی این روش از قوانین فیزیک برخورد بین دو جسم در یک بعد الهام گرفته شده است. در این روش کاندیداهای حل به اجسام با جرم-های مشخص یا ذرات تشبیه می‌شوند، که جرم هر جسم براساس رابطه ۱ با مقدار هر ذره رابطه معکوس دارد:

$$m_k = \frac{1}{\frac{fit(k)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{fit(i)}}}, \quad k=1,2,\dots,n \quad (1)$$

که $fit(i)$ نشان‌دهنده مقدار تابع هدف λ امین ذره است. همچنین سرعت هر جسم برابر با میزان جابجایی آن ذره است. پس از برخورد اجسام و با توجه به اصل بقای انرژی جنبشی و تکانه، میزان سرعت نهایی و پس از آن محل جدید ذرات براساس رابطه ۲ تعیین می‌شود:

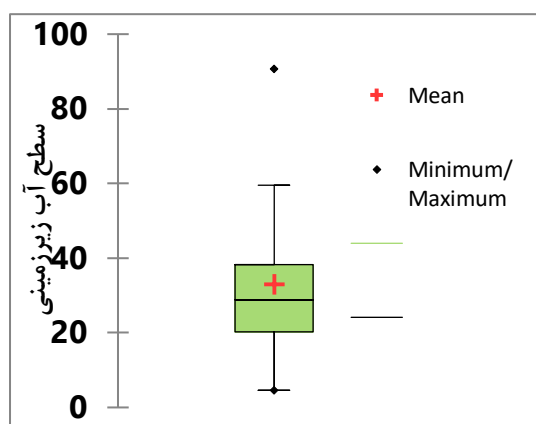
$$x_i^{new} = x_i^{old} + rand \circ v_i, \quad i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

^۱ Colliding Bodies Optimization

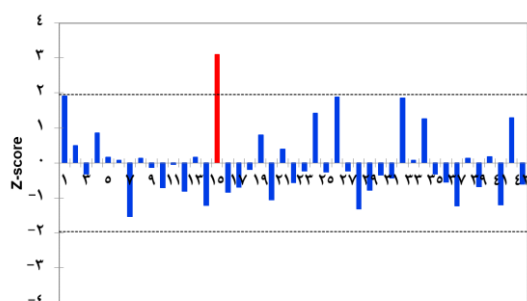
الگوریتم جامعه مورچه‌ها را در بهینه‌سازی شبکه پایش بسیار توجیه‌پذیر کرده است [۲۲]. مراحل پیاده‌سازی این روش در روندنمای تحقیق (شکل ۲) ارائه شده است. مراحل اجرای روش در تحقیقات مختلفی تشریح شده است [۲۲، ۲۳].

۴- نتایج و بحث

خلاصه آماری داده‌های ۴۳ چاه فعال آبخوان دشت اراک همانند شکل ۳-الف می‌باشد. در این تحقیق جهت بررسی داده‌های پرت از آزمون Grubbs استفاده شد (شکل ۳-ب). آزمون Grubbs هر بار یک داده پرت را تشخیص می‌دهد. داده پرت شناسایی شده از مجموعه داده حذف و آزمون تکرار می‌شود تا زمانی که هیچ داده‌ی پرت دیگری شناسایی نشود. تکرارهای متعدد احتمال تشخیص را تغییر می‌دهد و از این آزمایش نباید برای اندازه‌های نمونه شش یا کمتر استفاده شود؛ زیرا اغلب نقاط را به عنوان داده پرت نشان می‌دهد. بر اساس آزمون Grubbs داده‌ی چاه شماره ۱۵ به عنوان داده‌ی پرت شناسایی و از محاسبات خارج شد.



(الف)



(ب)

شکل ۳- تحلیل داده‌ها: (الف) خلاصه آماری داده‌ها در نمودار پلات جعبه‌ای، (ب) بررسی داده‌های پرت با آزمون Grubbs

پیش فرضی برای حذف روند^۱ در داده‌ها و یا نرمال بودن داده‌ها وجود ندارد [۱۲، ۲۸].

۳-۳- ارزیابی میزان کاهش دقت سطح

در این مرحله بعد از انتخاب مجموعه‌ای از ایستگاه‌ها با استفاده از روش برخورد اجسام و ایجاد سطح پیوسته‌ای با روش IDW، میزان کاهش دقت سطح و در نتیجه ارزش ایستگاه‌های پایش حذف شده محاسبه می‌شود. جهت محاسبه‌ی میزان کاهش دقت سطح، مقادیر ایستگاه‌های حذف شده، از سطح پیوسته‌ی ایجاد شده استخراج و با مقادیر واقعی مقایسه می‌شوند. مقدار کاهش دقت کل ایستگاه‌های حذف شده با استفاده از رابطه ۴ خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) محاسبه می‌شود. هر چه مقدار RMSE بیشتر باشد، نشان‌دهنده‌ی با ارزش بودن ایستگاه‌های حذف شده می‌باشد [۲۸].

$$e_i = x_i - \bar{x}_i$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}} \quad (۴)$$

در رابطه ۴، e_i خطا در مقدار ایستگاه نام که برای برداشت‌های آینده انتخاب نشده است، x_i مقدار تخمین زده شده از سطح ایجاد شده با روش IDW و مجموعه ایستگاه‌های انتخاب شده، \bar{x}_i مقدار اندازه‌گیری شده زمینی ایستگاه و n تعداد ایستگاه‌های پایش حذف شده می‌باشد.

۳-۴- اعتبار سنجی روش CBO

به منظور ارزیابی قابلیت روش CBO در مقایسه با سایر روش‌های فراکاوشی از روش کلونی مورچه^۲ (ACO) استفاده شد. روش ACO از جمله روش‌های محبوب و پرکاربرد در زمینه‌ی بهینه‌سازی شبکه‌های پایش آب زیرزمینی بوده است [۲۲، ۲۴]. این روش بر پایه رفتار طبیعی کلونی‌های مورچگان و جایگذاری فرومون^۳ توسط مورچگان کارگر شاغل بنا شده است. گسسته بودن فضای تصمیم از یک طرف و تعداد کثیری از متغیرهای صفر و یک در سیستم مدل‌سازی از طرف دیگر، استفاده از

^۱ Trend

^۲ Ant Colony Optimization

^۳ Pheromone

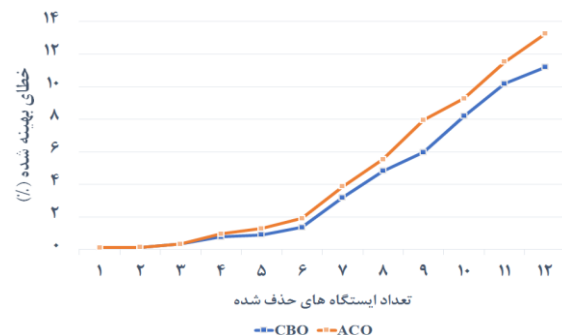
لیست چاه‌های حذف شده در هر مرحله در جدول ۱ آمده است. برای مثال نتایج نشان می‌دهد که در صورتی که قرار باشد سه چاه از مجموعه‌ی ایستگاه‌های پیش حذف شوند، چاه‌های ۵، ۲۳ و ۳۶ کاندید حذف می‌باشند.

جدول ۱- چاه‌هایی کم‌اهمیت که در هر مرحله حذف می‌شوند

تعداد	ایستگاه‌های حذف شده	شماره ایستگاه‌ها
۱	۵	
۲	۲۳، ۵	
۳	۳۲، ۲۳، ۵	
۴	۳۶، ۹، ۶، ۵	
۵	۴۰، ۳۶، ۳۰، ۶، ۵	
۶	۴۰، ۳۶، ۳۰، ۹، ۶، ۵	
۷	۴۰، ۳۶، ۳۰، ۲۷، ۱۱، ۹، ۶	
۸	۴۳، ۴۰، ۳۶، ۱۲، ۹، ۸، ۶، ۵	
۹	۴۰، ۳۸، ۳۶، ۳۵، ۲۱، ۱۶، ۱۳، ۱۲، ۵	
۱۰	۴۰، ۳۸، ۳۷، ۳۴، ۳۰، ۱۲، ۸، ۶، ۵، ۳	
۱۱	۴۲، ۴۰، ۳۶، ۳۴، ۲۷، ۲۵، ۱۹، ۱۱، ۸، ۶، ۵	
۱۲	۴۳، ۴۲، ۴۰، ۳۶، ۳۴، ۲۵، ۱۹، ۱۷، ۱۱، ۶، ۵، ۳	

در مجموعه‌های فوق چاه شماره ۵ در تمامی مجموعه‌های ایستگاه‌های حذف شده به جز حذف ۷ ایستگاه قرار دارد، لذا در اولویت حذف در همه‌ی سناریوها قرار دارد. در سناریو حذف سه ایستگاه علاوه بر چاه ۵ که در همه‌ی سناریو در اولویت حذف قرار دارد، دو چاه ۲۳ و ۳۲ برای حذف انتخاب شده‌اند اما در سناریو حذف چهار ایستگاه ضمن اضافه شدن چاه ۶ دو چاه ۹ و ۳۶ (به جای دو چاه ۲۳ و ۳۲ در سناریو سوم) برای حذف انتخاب شده‌اند. اگر موقعیت مکانی دو چاه ۳۲ و ۳۶ را با دو چاه ۹ و ۲۳ مقایسه کنیم (شکل ۵)، مشاهده می‌شود که از نظر مسافتی این چاه‌ها دوبره‌دو به هم نزدیک هستند و به نظر می‌رسد چاه ۲۳ با چاه ۹ و چاه ۳۲ با چاه ۳۶ جایگزین شده‌اند. اگرچه از سناریو ششم به بعد این ایستگاه‌ها در کنار هم در اولویت حذف قرار می‌گیرند، که نشان می‌دهد مقادیر اندازه‌گیری شده در شبکه پیش در این محدوده نزدیک به هم هستند و این چاه‌ها با اختلاف امتیازی پایینی در اولویت حذف هستند. به‌طور کلی بر اساس موقعیت ایستگاه‌های حذف شده در هر سناریو مشاهده می‌شود که منطقه به سه بخش کلی شمالی، جنوبی و بخش جنوب شرقی تقسیم شده است. در سه

برای پیاده‌سازی روش برخورد اجسام تعداد ذرات یا همان کاندیداهای حل^۱ برابر با ۵۰ و تعداد تکرارهای بهینه‌یابی^۲ برابر با ۵۰۰ در نظر گرفته شده است. در روش IDW توان استفاده شده در تخمین وزن ۲ در نظر گرفته شد. روش پیشنهادی به ازای حذف تعداد چاه‌های مختلف اجرا شد؛ ابتدا فرض شد که یک چاه از مجموعه حذف شود، بدین منظور ایستگاهی که کمترین اطلاعات را به شبکه تزریق می‌کند و مقدار آن توسط سایر ایستگاه‌های موجود قابل محاسبه است شناسایی و حذف شد. با حذف این ایستگاه میزان خطا محاسبه و در شکل ۴ برای هر دو روش CBO و ACO درج شده است. در ادامه محاسبات برای سناریوهای مختلف با حذف ۲ تا ۱۲ چاه پیش تکرار و میزان خطا محاسبه شد.



شکل ۴- نمودار افزایش خطا به ازای کاهش تعداد نقاط

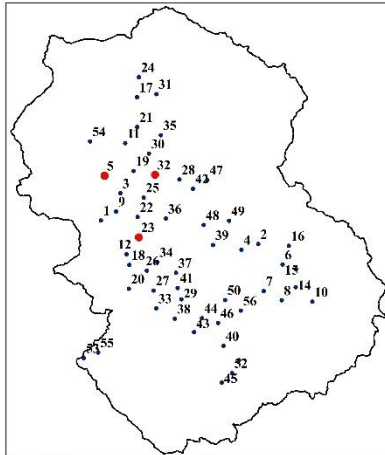
شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد ایستگاه‌های حذف شده میزان خطا افزایش می‌یابد. مقایسه‌ی نتایج دو روش CBO و ACO نشان می‌دهد که به غیر از خطای سه چاه اول، بعد از حذف چاه چهارم همواره خطای بهینه شده‌ی روش CBO کمتر از ACO می‌باشد. این خروجی نشان می‌دهد روش CBO به خطای کمتری دست پیدا کرده و قابلیت این روش در مقایسه با روش ACO مشهود می‌باشد.

بر اساس نمودار روش CBO، با وجود حذف شش ایستگاه از مجموعه‌ی ایستگاه‌های پیش مقدار RMSE (خطای برآورد) کمتر از ۳۵ سانتی متر می‌باشد. بعد از حذف ۷ امین ایستگاه خطای ایجاد با شیب بالایی افزایش پیدا می‌کند.

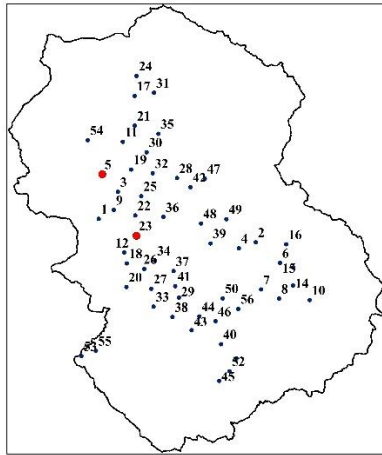
^۱ Agents
^۲ Iterations

تغییرات سطح آب زیرزمینی در چاه‌ها کمتر بوده و با کاهش تعداد چاه‌ها در این بخش می‌توان با استفاده از داده‌های چاه‌های مجاور مقادیر چاه‌های حذف شده را محاسبه کرد.

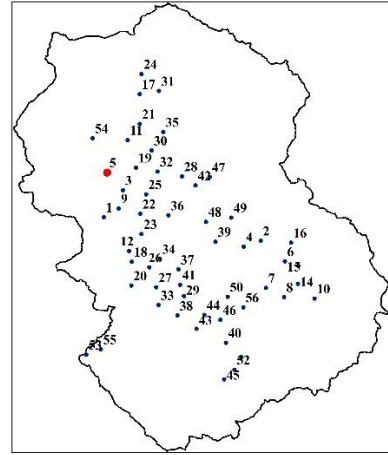
سناریو اول چاه‌های حذف شده در بخش شمالی آبخوان قرار دارد. از سناریو چهار همواره ایستگاه شماره ۶ از بخش جنوب شرقی و از سناریو پنجم همواره ایستگاه ۴۰ از بخش جنوبی در اولویت حذف قرار می‌گیرد. تراکم ایستگاه‌های حذف شده در بخش شمالی نشان می‌دهد که



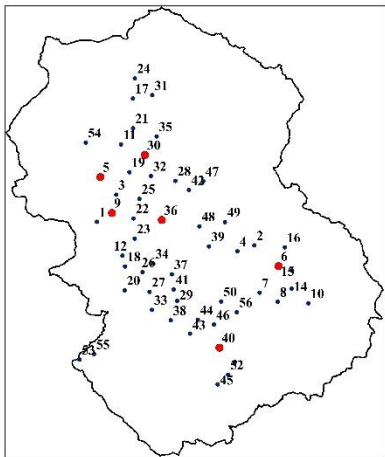
چاه های آب زیرزمینی • سه چاه حذف شده •



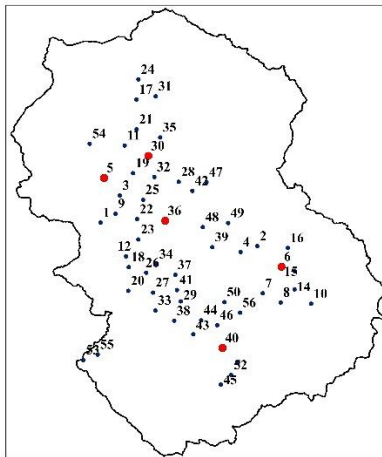
چاه های آب زیرزمینی • دو چاه حذف شده •



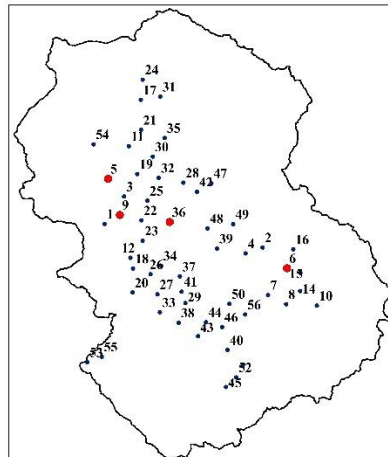
چاه های آب زیرزمینی • یک چاه حذف شده •



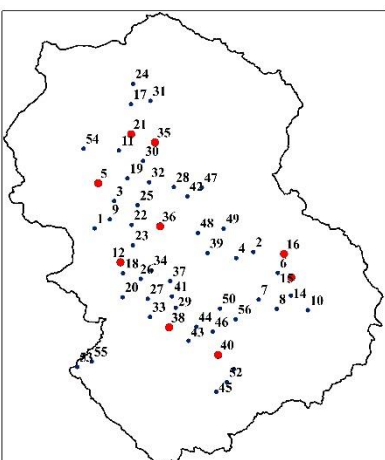
چاه های آب زیرزمینی • سه چاه حذف شده •



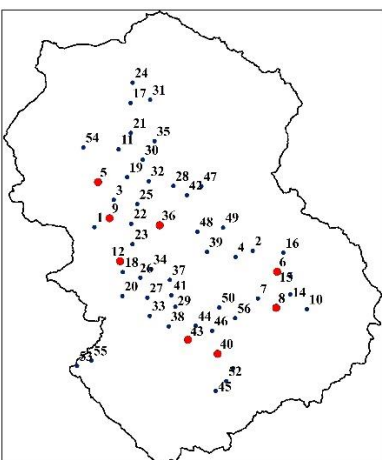
چاه های آب زیرزمینی • پنج چاه حذف شده •



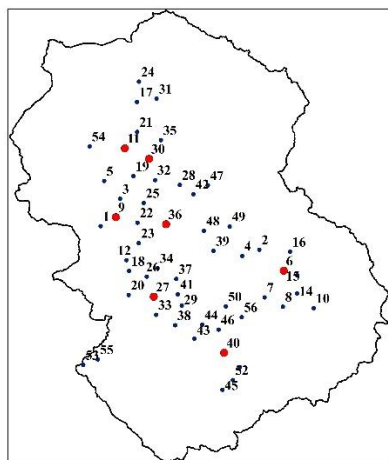
چاه های آب زیرزمینی • چهار چاه حذف شده •



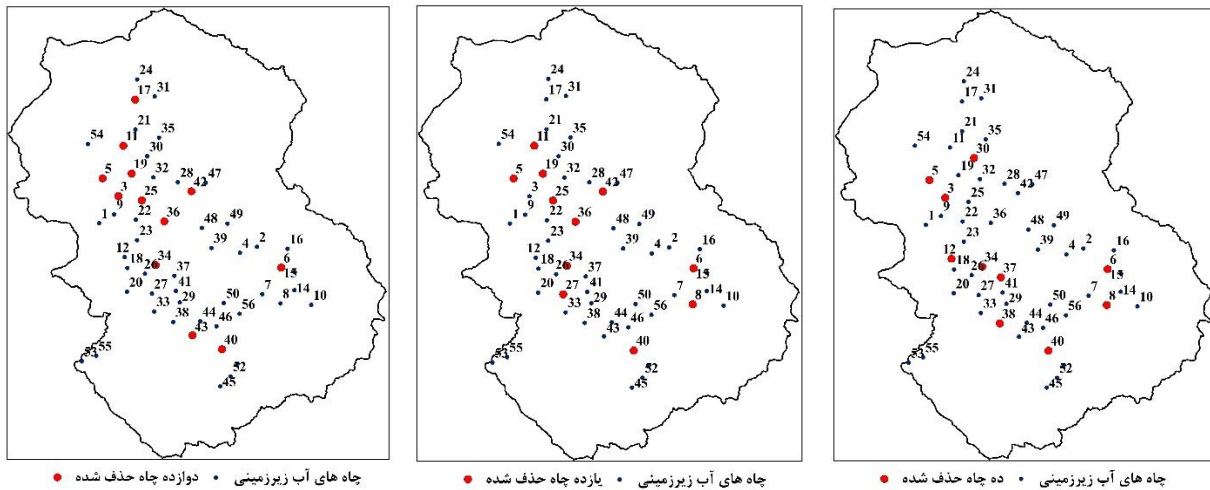
چاه های آب زیرزمینی • نه چاه حذف شده •



چاه های آب زیرزمینی • هشت چاه حذف شده •



چاه های آب زیرزمینی • هفت چاه حذف شده •



شکل ۵- نمایش مکانی چاه‌های حذف شده در هر مرحله

بحرانی شوند و نیاز به چاه‌های بیشتری در آن مناطق باشد. لذا می‌توان توالی اندازه‌گیری در شش چاه ۵، ۶، ۹، ۳۰، ۳۶ و ۴۰ را کاهش داد. در آینده بهتر است فرآیند طراحی شبکه پایش به صورت دوره‌ای و چند سال یک بار با توجه به شرایط کیفی موجود طراحی شود (۵، ۷). هر چه تعداد چاه‌های بیشتری از شبکه پایش حذف شود، در عین حال که هزینه‌ها را کاهش می‌دهد، به همان اندازه پراکنش مکانی چاه‌ها در شبکه پایش نیز کاهش می‌یابد. حذف این ۶ نقطه ۳۵ سانتی متر خطا به شبکه تحمیل می‌کند، اما در مقابل موجب صرفه‌جویی اقتصادی می‌شود.

در تحقیق حاضر ۴ چاه حذف شده در بخش شمال دشت و ۱ چاه در جنوب و ۱ چاه در جنوب شرقی منطقه قرار داشت. با ارزیابی موقعیت ایستگاه‌های حذف شده می‌توان نتیجه گرفت نیمه بالایی منطقه در ارزیابی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی شرایط مناسب‌تری دارد. نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیق گنجی خرم‌دل و همکاران (۱۳۹۴) که در دشت اراک انجام شده بود تقریباً مشابه می‌باشد. بر اساس تحقیق انجام شده توسط گنجی خرم‌دل و همکاران (۱۳۹۴) که بر روی ۴۵ چاه سنجش سطح آب زیرزمینی دشت اراک با داده‌های سال ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳ انجام شده بود، حذف ۵ چاه از میانه دشت اراک توصیه شده بود. در هر دو تحقیق مشاهده شده که چاه‌های پایش آب زیرزمینی در دشت اراک در بخش مرکزی دشت پراکنده شده و در حاشیه‌های دشت تراکم شبکه پایش ناکافی می‌باشد. لذا در حاشیه‌ها بخصوص در شمال شرق دشت اراک ارزیابی و توسعه شبکه نیازمند نقاط نمونه‌برداری بیشتر است.

با در نظر گرفتن موقعیت چاه‌های حذف شده و محدوده تالاب میقان (شکل ۱) مشخص می‌شود که در شش سناریوی اول چاه‌های حذف شده بیشتر در مرکز آبخوان قرار دارند و از چاه‌های کناری داده‌ای حذف نمی‌شود. از سناریوی هفتم به بعد ایستگاه‌های پایش موجود در حاشیه آبخوان نیز حذف شده‌اند که با توجه به شکل ۴ از سناریو هفتم به بعد مقدار خطا با شیب بیشتری افزایش پیدا می‌کند. همچنین مشخص است که از چاه‌های واقع در محدوده تالاب میقان (چاه‌های ۴، ۲۹، ۳۷، ۳۹، ۴۱، ۴۴، ۴۸ و ۵۰) در هیچ کدام از سناریوها چاهی حذف نشده که نشان از اهمیت ایستگاه‌های واقع در حاشیه تالاب هستند.

تعداد چاه حذف شده و در نتیجه میزان خطای قابل قبول بعد از حذف ایستگاه‌ها در بهینه‌سازی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی در تحقیقات مختلف متفاوت بوده است. مثلاً در آبخوان دشت سیلاخور ۶۲ درصد از چاه‌ها قابل حذف بودند [۱۶]. در آبخوان دشت شهرکرد ۱۷ درصد [۲۹]، در آبخوان دشت دزفول-اندیمشک ۲۰ درصد [۳]، در آبخوان دشت دهگلان ۱۹ درصد [۹] چاه‌ها قابل حذف معرفی شدند. تعداد چاه‌های حذف شده به تراکم اولیه شبکه، دقت نهایی شبکه، نظرات کارشناسی و غیره وابسته می‌باشد. در این تحقیق بر اساس شیب افزایش مقدار خطای RMSE در شکل ۴، موقعیت ایستگاه‌ها حذف شده در سناریوهای مختلف و همچنین نظرات کارشناسی در نهایت حذف ۶ چاه از مجموعه ایستگاه‌های پایش مناسب و معقول تشخیص داده شد. البته باید در نظر داشت که حذف بعضی از چاه‌ها از شبکه‌ی نمونه‌برداری، موقتی است زیرا ممکن است در آینده شرایطی ایجاد شود که از نظر کیفی و یا کمی مناطقی

۵- نتیجه‌گیری

شناسایی تعداد و موقعیت چاه‌های بهینه در پایش سطح آب زیرزمینی در هنگام مواجهه با حجم بالای داده‌ها در گستره‌ی زمانی حائز اهمیت است. در این تحقیق شبکه پایش سطح آب زیرزمینی آبخوان اراک با روش فراکاوشی جدید برخورد اجسام محاسبه شد. در شبکه پایش آبخوان دشت اراک اگرچه فاصله چاه‌ها تقریباً مساوی است اما پراکندگی آن‌ها به صورت یکنواخت نمی‌باشد. بر اساس نمودار خطای ترسیم شده به ازای حذف چاه‌ها برای روش CBO و ACO مشاهده شد که با افزایش تعداد ایستگاه‌های حذف شده، میزان خطا در شبکه افزایش می‌یابد. مقایسه‌ی خطای بهینه شده برای دو روش نشان می‌دهد که بعد از حذف چاه چهارم، همواره خطای بهینه شده برای روش CBO کمتر می‌باشد که نشان از قابلیت این روش در بهینه‌سازی تعداد چاه‌های شبکه پایش می‌باشد. براساس منحنی روش CBO مشاهده می‌شود که میزان افزایش خطا تا حذف ۶ ایستگاه کمتر از ۳۵ سانتی متر می‌باشد. در ادامه با حذف ۷ امین ایستگاه مقدار خطای ایجاد شده با شیب بالایی شروع به افزایش می‌کند. لذا بر اساس نمودار موجود، موقعیت چاه‌های حذف شده در هر سناریو و نظرات کارشناسی، شش چاه ۵، ۶، ۹، ۳۰، ۳۶ و ۴۰ از میان چهل‌وسه چاه برداشت‌شده در سال ۱۳۹۷ بدون اینکه نقصان معنی‌داری در اطلاعات حاصل شود حذف شدند. بیشتر چاه‌های حذف شده در بخش شمالی شبکه پایش قرار داشتند و با توجه به اهمیت چاه‌های اطراف تالاب میقان چاهی از این منطقه حذف نشد. به این

مراجع

ترتیب هم از نظر هزینه و هم از نظر زمان مورد نیاز برای هر اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی صرفه‌جویی خواهد شد. این تغییرپذیری باید در طول زمان در بازه‌های مشخص بررسی شود زیرا ممکن است نقش چاه در طول زمان تغییر کند.

به کمک خروجی این تحقیق می‌توان سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت اراک را در آینده با تعداد کمتری از ایستگاه‌ها سنجید و رویکردهای مدیریتی مناسبی را برای سنجش بهینه از منابع آب زیرزمینی در پیش گرفت. نظر به اینکه اجرای برنامه‌های پایش منابع آب هزینه‌بر و نیاز به صرف وقت می‌باشد، بررسی روشی برای بهینه‌سازی شبکه‌ی موجود ضروری بوده و صرفه‌جویی و مدیریت اقتصادی نیز کمک می‌کند.

در تحقیقات آتی تئوری آنتروپی در کنار سایر روش‌های درون‌یابی (مانند کریجینگ، اسپیلاین) برای ایجاد تابع هدف قابل پیاده‌سازی می‌باشد، که موجب می‌شود تابع هدف استفاده شده در روش CBO از دو مفهوم مکانی و زمانی بهره‌برد. مقایسه‌ی روش پیشنهادی با سایر روش‌های بهینه‌سازی مانند بهینه‌سازی ازدحام ذرات، تبرید شبیه‌سازی شده و ژنتیک به منظور ارزیابی و درک جامعیت روش پیشنهادی توصیه می‌شود. همچنین بررسی روش پیشنهادی در یک بازه‌ی زمانی طولانی مثلاً ۵ ساله برای داده‌های آب زیرزمینی یا سایر ایستگاه‌های پایش پدیده‌های جغرافیایی پیشنهاد می‌شود که به موجب آن می‌توان اطلاعات زمانی را در بهینه‌سازی دخالت داد.

- [1] Jiang, J., Tang, S., Han, D., Fu, G., Solomatine, D. and Zheng, Y. (2020). "A comprehensive review on the design and optimization of surface water quality monitoring networks." *Environmental Modelling & Software*. Vol. 132, No. PP. 104792.
- [2] Sadatinejadi, S.J., Ghasemi, L. and Yousefi, H. (2018). "Redesign of Groundwater Monitoring Network Kuhdasht Aquifer." *Iranian journal of Ecohydrology*. Vol. 5, No. 4, PP. 1255-1266, (in Persian).
- [3] Raesi, A., Ghafouri, H.-R. and Moslemzadeh, M. (2018). "Minimization of Groundwater Observation Wells Using Geostatistics and Optimization Technique (Case study: Dezful-Andimeshk plain)." *Journal of Water and Soil Conservation*. Vol. 25, No. 3, PP. 79-96, (in Persian).
- [4] Jafarzadeh, A. and Khashei siuki, A. (2018). "Performance examination of optimization model of groundwater monitoring network based on Gray wolf and Neural network (GNM) (Case study: Birjand plain)." *Irrigation and Water Engineering*. Vol. 8, No. 3, PP. 121-139, (in Persian).
- [5] Nazeri-Tahroudi, M., Shahidi, A., khashei siuki, A. and Ramezani, Y. (2019). "Designing Monitoring Network for Rain Gauge Stations Using Irregularity Theory (Case Study: Urmia Lake Basin)." *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*. Vol. 13, No. 2, PP. 296-308, (in Persian).

- [5] Ayvaz, M.T. and Elçi, A. (2018). "Identification of the optimum groundwater quality monitoring network using a genetic algorithm based optimization approach." *Journal of Hydrology*. Vol. 563, No. PP. 1078-1091.
- [6] Janatrostami, S. and Salahi, A. (2020). "Design of the optimal groundwater quality monitoring network using a genetic algorithm based optimization approach." *Environmental Sciences*. Vol. 18, No. 2, PP. 19-40, (in Persian).
- [7] Uddameri, V., Karim, A., Uddameri, E. and Srivastava, P. (2017). "Sensitivity of Wells in a Large Groundwater Monitoring Network and Its Evaluation Using GRACE Satellite Derived Information", in *Sensitivity Analysis in Earth Observation Modelling*. p. 235-256.
- [8] Hosseini, M. and Kerachian, R. (2017). "A data fusion-based methodology for optimal redesign of groundwater monitoring networks." *Journal of Hydrology*. Vol. 552, No. PP. 267-282.
- [9] Farlin, J., Gallé, T., Pittois, D., Bayerle, M. and Schaul, T. (2019). "Groundwater quality monitoring network design and optimisation based on measured contaminant concentration and taking solute transit time into account." *Journal of Hydrology*. Vol. 573, No.
- [10] Pérez, C.J., Vega-Rodríguez, M.A., Reder, K. and Flörke, M. (2017). "A Multi-Objective Artificial Bee Colony-based optimization approach to design water quality monitoring networks in river basins." *Journal of Cleaner Production*. Vol. 166, No. PP. 579-589.
- [11] Sabzipour, B., Asghari, O. and Sarang, A. (2019). "Evaluation and optimal redesigning of river water-quality monitoring networks (RWQMN) using geostatistics approach (case study: Karun, Iran)." *Sustainable Water Resources Management*. Vol. 5, No. 2, PP. 439-455, (in Persian).
- [12] Maghsudsangatah, S., Khashei Siuki, A., Pourreza Bilondi, M. and Shafiei, M. (2018). "Application of acceptance probability method in assessment of groundwater quality monitoring network (Case Study Mashhad aquifer)." *Iran-Water Resources Research*. Vol. 14, No. 1, PP. 253-256, (in Persian).
- [13] Ganji Khoramdel, N., Keykhaei, F. and Mardian, M. (2015). "Design and development of groundwater level monitoring network using geostatistical and statistical methods in Arak plain." *Iranian Journal of Geophysics*. Vol. 9, No. 3, PP. 17-29, (in Persian).
- [14] Ebrahimi, K., araghineghad, s. and Mohammadi Qaleh Ney, M. (2011). "Quantitative and qualitative evaluation of groundwater resources (Case study: Saveh and Arak aquifers)." *Water and soil knowledge*. Vol. 21, No. 2, PP. 93-108, (in Persian).
- [15] Komasi, M. and Goudarzi, H. (2019). "The Application of the Entropy and Empirical Basin Kriging for the Optimization and Spatial Interpolation of Groundwater Monitoring Network (Case Study: Silakhor Plain)." *Hydrogeomorphology*. Vol. 6, No. 19, PP. 145-162, (in Persian).
- [16] Ramezani, Y., Pourreza-Bilondi, M., Yaghoobzadeh, M. and Nazeri Tahradi, M. (2018). "Qualitative Monitoring of Drinking Water Using Entropy Indices (Case Study: Central Aquifer of Birjand Plain)." *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*. Vol. 12, No. 3, PP. 556-568, (in Persian).
- [17] Hooshangi, N., Alesheikh, A.a. and Nadiri, a.a. (2016). "Optimization of Piezometers Number for Groundwater Level Prediction Using PCA and Geostatistical Methods." *Water and Soil Science*. Vol. 25, No. 4, PP. 53-66, (in Persian).
- [18] Pahlavani, P., Sheikhan, H. and Bigdeli, B. (2017). "Assessment of an air pollution monitoring network to generate urban air pollution maps using Shannon information index, fuzzy overlay, and Dempster-Shafer theory, A case study: Tehran, Iran." *Atmospheric Environment*. Vol. 167, No. PP. 254-269.
- [19] Lee, S.-S., Kim, H.-H., Joun, W.-T. and Lee, K.-K. (2017). "Design and Construction of Groundwater Monitoring Network at Shallow-depth CO₂ Injection and Leak Test Site, Korea." *Energy Procedia*. Vol. 114, No. PP. 3060-3069.
- [20] Kim, D.S., Chung, B.J. and Son, S.-Y. (2017). "Implementation of a Low-Cost Energy and Environment Monitoring System Based on a Hybrid Wireless Sensor Network." *Journal of Sensors*. Vol. 2017, No. PP. 5957082.
- [21] Hooshangi, N. (2019). "Determination of valuable piezometric wells in groundwater level prediction by considering spatiotemporal information." *journal of environmental geology*. Vol. 13, No. PP. 37-49, (in Persian).
- [22] Li, Y. and Chan Hilton, A.B. (2007). "Optimal groundwater monitoring design using an ant colony optimization paradigm." *Environmental Modelling & Software*. Vol. 22, No. 1, PP. 110-116.
- [23] Moeini, R. and Afshar, M.H. (2017). "Arc Based Ant Colony Optimization Algorithm for optimal design of gravitational sewer networks." *Ain Shams Engineering Journal*. Vol. 8, No. 2, PP. 207-223.

- [24] Kaveh, A. and Mahdavi, V.R. (2014). "Colliding bodies optimization: A novel meta-heuristic method." Computers & Structures. Vol. 139, No. PP. 18-27.
- [25] Zandiyehukili, M. "Water Crisis" Roundtable - Arak, More than 2 million m3 of groundwater resources are extracted in Markazi province. 2018 [cited 2021; Available from: <https://www.tasnimnews.com/fa/news/1397/02/26/1727498>.
- [26] Kaveh, A. and Mahdavi, V.R. (2015). "Colliding Bodies Optimization: Extensions and Applications". Springer.
- [27] Hooshangi, N. and Mahdizadeh Gharakhanlou, N. (2020). "Spatial distribution of the carbon monoxid using common and modern interpolation methods (Case study of Tehran)." Journal of Civil and Environmental Engineering. Vol., No, (in Persian).
- [28] Abdollahi Mansourkhani, M., Mohammadzade, H., Amini, M. and Azizi, F. (2019). "Assessment of Groundwater Quality Spatial Distribution and Appointment Optimize Network of Shahrkord Plain Aquifer Using Geostatistical Methods." Watershed Management Researches Journal. Vol. 32, No. 2, PP. 60-78, (in Persian).