مجله علمی - پژوهشی
دوره 10، شماره 1، بهار 1394

بهینه‌سازی شبکه پایش تراز آب زیرزمینی با استفاده از روش فرا کاوشی اجزای جمعی

ناصر گنجی خرم دل[1*]، فاطمه کیخایی[2]، کورش محمدی[3]، محمد جواد منعم[3]

1- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اراک
2- کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اراک
3- دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

* naser.ganjikhorramdel@gmail.com

چکیده - با توجه به پیچیدگی‌های محیط آب زیرزمینی و هزینه‌های قابل‌توجه روش‌های مرسوم پایش، ابداع فن‌آوری‌های نو و بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته در این امر، کمک شایانی در بهبود شناخت سامانه‌های آب زیرزمینی کرده است. روش‌های معمول مورد استفاده نیازمند فرایندهای تکراری هستند و در یک مسأله ترکیبی غیرخطی، قادر به اعمال جستجوی بهینه سراسری و آنالیز حساسیت تحت قیدهای مختلف نمی‌باشند. در این تحقیق از الگوریتم بهینه‌سازی گسسته اجزای جمعی به منظور حداقل نمودن فقدان داده کل در شبکه کاهش یافته یا بهینه شده استفاده گردید. به منظور بررسی قابلیت روش، الگوریتم بر روی یک شبکه پایش با تعداد 57 چاه مشاهده‌ای بکار گرفته شد. با کاهش تعداد چاه‌های شبکه تا 42 چاه، مقدار جذر میانگین مربع خطا اندازه‌گیری شد. با تعیین حد آستانه 0/3 برای خطا، شبکه بهینه با تعداد 45 چاه باقی‌مانده بدست آمد. مقایسه خطوط تراز سطح ایستابی حالات مختلف با شبکه اصلی نشان داد که حل‌های الگوریتم پیشنهادی مؤثر و مطلوب بوده و تنها در حالت 42 چاه باقی‌مانده، در برخی از خطوط تراز کمی انقطاع دیده شد. در مقایسه با الگوریتم ژنتیک، حل‌های حاصل از الگوریتم اجزای جمعی از راندمان بالاتری برخوردار بوده و دارای سرعت همگرایی سریعتری بود. از نظر مقایسه مقادیر RMSE و نیز مقایسه خطوط تراز تخمینی سطح ایستابی با خطوط تراز اصلی شبکه، دو الگوریتم قابل مقایسه بوده و توزیع چاه‌های مستعد حذف، موید این مطلب بود.

کلیدواژگان: تراز آب زیرزمینی، پایش، الگوریتم اجزای جمعی گسسته، بهینه‌سازی.

1- مقدمه

با توجه به پیچیدگی‌های محیط آب زیرزمینی و هزینه‌های قابل توجه روش‌های مرسوم پایش، ابداع فن‌آوری‌های نو و بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته در این امر، کمک شایانی در بهبود شناخت سامانه‌های آب زیرزمینی کرده است. یکی از پارامترهایی که در پایش کمّی آب زیرزمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، تراز آب زیرزمینی می‌باشد. لذا باید این پارامتر را تا حد امکان با دقت بالایی اندازه‌گیری کرد یا تخمین زد. قابل ذکر است که روش‌های معمول مورد استفاده با توجه به عدم کفایت آمار و اطلاعات موجود و همچنین پایین بودن دقت روش‌های مورد استفاده، برآورد صحیحی از تراز آب زیرزمینی ندارند. علاوه بر این، بیشتر این روش‌ها نیازمند فرایندهای تکراری هستند و در یک مسأله ترکیبی غیرخطی، قادر به اعمال جستجوی بهینه سراسری و آنالیز حساسیت تحت قیدهای مختلف نمی‌باشند.

Archive of SID
www.SID.ir

بهینه‌سازی طراحی یک شبکه پایش آب زیرزمینی را می‌توان به وسیله روش‌های متنوعی انجام داد. انتخاب روش مناسب شامل معیارهای بیشماری بوده که مهمترین آنها اهداف ویژه آن منطقه بخصوص و همچنین مقدار و نوع داده‌های در دسترس را شامل می‌شود. به طور معمول بهینه‌سازی شبکه پایش، یک مسأله ترکیبی غیرخطی است و برای حل آن، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی فرا کاوشی مناسب می‌باشد. هدف از مدل طراحی شبکه پایش، پیدا کردن نقشه نمونه‌گیری بهینه از میان حالت‌های بی‌شمار است که حل آنها باید با استفاده از فرایندهای تکراری بدست آید و در نتیجه این روش‌ها نیازمند تلاش‌های محاسباتی دشواری می‌باشند. به عنوان مثال اگر در یک شبکه تعداد 100 محل پایش وجود داشته باشد، تعداد 2^{100} امکان برای طراحی‌های نمونه‌گیری باید ارزیابی شود. بنابراین برای یک استفاده عملی و امکان پذیر لازم است که در یک الگوریتم بهینه-سازی، تابع هدف فقط برای جزئی از تمام طراحی‌های امکان‌پذیر شبکه، تا قبل از رسیدن به حل بهینه و یا نزدیک بهینه ارزیابی گردد.

Nielsen (1991) در کتاب پایش آب زیرزمینی به جنبه‌های مختلف تحقیقات کیفی آب زیر زمینی پرداخته و این کتاب بیشتر جنبه کاربردی درخصوص پایش آب زیر زمینی دارد که نویسنده در تألیف آن از تجربیات بیش از 30 دانشمند بهره گرفته است. در تحقیقی که توسط Cieniawski et al. (1995) انجام پذیرفت، شبکه‌های پایش طولانی مدت در ترکیب با شبیه‌سازی مونت کارلو[1] بهینه گردید.

تعداد هشت الگوریتم توسط Lee and Ellis (1996) در یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی صحیح (در دو کاربرد) مورد مقایسه قرار گرفته و نتیجه گردید که الگوریتم‌های ابتکاری برای حل مسایل طراحی شبکه پایش آب زیرزمینی رضایت بخش می‌باشند. در مطالعه دیگری Reed et al. (2000) یک مدل بهینه‌سازی براساس الگوریتم ژنتیک و یک تخمینگر جرم سراسری[2] را به منظور جستجوی طرح‌های نمونه‌گیری مورد استفاده قرار دادند. روش میان‌یابی مورد استفاده در این مطالعه به منظور تخمین گستره آلاینده بر اساس کریجینگ معمولی[3] و نیز روش میان‌یابی فاصله معکوس وزنی[4] می-باشد. روش بهینه‌سازی اجزای جمعی (PSO)[5] توسط Wegley *et al.* (2000) برای تعیین سرعت پمپ‌ها به منظور حداقل نمودن هزینه‌های کلی در سیستم‌های توزیع آب استفاده گردید. Tuinhof (2002) در یادداشت تحقیقاتی خود بر هدف و میزان سودمندی شبکه های پایش اشاره نموده و به موارد متعددی نیز در خصوص پایش آب های زیرزمینی پرداخته است که می‌توان مواردی نظیر انواع داده‌های مورد نیاز برای مدیریت‌های مختلف آب زیرزمینی, طبقه‌بندی سیستم‌های پایش آب زیرزمینی بر اساس نوع عملکرد شامل پایش مرجع[6]، پایش حفاظتی[7] و انتقال آلودگی را نام برد. روش SA به همراه روش‌های آماری توسط Nunes et al. (2004) به منظور کم‌کردن نمونه‌گیری از نظر زمانی و افزایش دقت مکانی شبکه‌های پایش طولانی مدت استفاده شد. کار Reed به وسیله Wu et al. (2005) با معرفی قیدهای جدید به همراه گشتاورهای مکانی، برای افزایش دقت تخمین‌های میان‌یابی بهبود پذیرفت. در مطالعه‌ای Li and Chan Hilton (2006) از روش بهینه‌سازی جامعه مورچگان برای حل مسأله بهینه‌سازی طراحی شبکه پایش آب زیرزمینی استفاده نمودند. در این تحقیق نیز ضمن بررسی غلظت یک آلاینده در شبکه پایش کیفی، تنها به بهینه‌سازی مکانی شبکه اکتفا شده است. Jousma (2008) در کتاب جامع خود برنامه‌ای برای شناسایی، توسعه و مدیریت پایش آب زیرزمینی ارائه نمود که از اهداف این برنامه پایش، طبقه‌بندی سیستم‌های پایش منطقه‌ای، شناسایی روند آنها در طی زمان و پیش‌بینی اثرات منطقه‌ای برداشت آب‌های زیرزمینی می‌باشد. همچنین در این کتاب روش‌هایی به منظور بررسی جنبه های اقتصادی برداشت، معرفی شده است. قابل ذکر است که عمده تحقیقات صورت گرفته تاکنون، بر شبکه‌های پایش کیفی

1. Monte Carlo Simulation
2. Global Mass Estimator
3. Ordinary Kriging
4. Inverse Distance Weighted
5. Particle Swarm Optimization
6. Reference Monitoring
7. Protection Monitoring

Archive of SID
www.SID.ir

متمرکز بوده است که به دلیل فراوانی مناسب چاه‌های بهره برداری، حل مسأله از سهولت بیشتری برخوردار بوده است. در این تحقیق یک شبکه پایش سطح آب زیرزمینی طراحی و بهینه شده است. روش بهینه‌سازی اجزای جمعی در ابتدا، به منظور بهینه‌سازی مسائل پیوسته بسط و گسترش یافت و کاربرد آن در مسایل گسسته از زمینه تحقیقاتی بسیار جدیدی برخوردار است. تعداد این تحقیقات (مسایل گسسته بسط یافته با الگوریتم اجزای جمعی) در مطالعات منابع آب انگشت شمار بوده و بیشتر در زمینه های طراحی بهینه شبکه تامین و توزیع آب (Suribabu and Neelakantan., 2006; Montalvo et al., 2008)، طراحی بهینه شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب (Izquierdo et al., 2008) و پیش بینی تراز آب رودخانه (Chau., 2004) گسترش داشته است. در ضمن لازم به ذکر است که الگوریتم اجزای جمعی تاکنون در طراحی شبکه پایش آب زیرزمینی استفاده نشده است. لذا در این تحقیق یک الگوریتم گسسته اجزای جمعی برای حل مسأله طراحی بهینه شبکه پایش، با اقتباس از مسأله فروشنده دوره گرد ارائه شده است. مسأله فروشنده دوره-گرد یک مسأله ترکیبی سخت و غیر قطعی پلی‌نومیال کلاسیک[1] می‌باشد که به عنوان آزمونی مهم برای ارزیابی بسیاری از الگوریتم‌های دیگر قرار می‌گیرد.

2- مواد و روشها

2-1- حل مسایل گسسته با الگوریتم اجزای جمعی

روش بهینه‌سازی اجزای‌جمعی در ابتدا، به منظور بهینه‌سازی مسائل پیوسته بسط و گسترش یافت و کاربرد آن در مسایل گسسته از زمینه تحقیقاتی بسیار جدیدی برخوردار است. در بیشتر این مطالعات عمدتاً برای گسسته کردن فضای جستجو از روش گرد کردن[2] بردارهای سرعت استفاده شده است (Suribabu and Neelakantan., 2006; Montalvo et al., 2008). در این تحقیق یک الگوریتم گسسته اجزای جمعی برای حل مسأله طراحی بهینه شبکه پایش، با اقتباس از مسأله فروشنده دوره گرد ارائه شده است. سختی و پیچیدگی بکارگیری این روش در فضاهای جستجوی ترکیبی پیچیده در این جمله خلاصه می‌شود که پارامترهای سرعت و مسیر حرکت، برای مسیرهای مسأله فروشنده دوره‌گرد، جایگشت، برنامه‌ریزی و غیره دارای بسط طبیعی نمی‌باشند (Poli *et al*., 2007). با این حال اخیرا پیشرفت‌هایی در این زمینه انجام شده است (Clerc., 2004; Clerc., 2006; Moraglio *et al*., 2007). از طرف دیگر عمده تحقیقات صورت گرفته تاکنون، بر شبکه‌های پایش کیفی متمرکز بوده است که به دلیل فراوانی مناسب چاه‌های بهره‌برداری، حل مسأله از سهولت بیشتری برخوردار می‌باشد. در این تحقیق یک شبکه پایش تراز آب زیرزمینی طراحی و بهینه شده است.

2-2- ضوابط طراحی شبکه پایش کمّی

یک شبکه مناسب، شبکه‌ای است که با کمترین تراکم، بیشترین اطلاعات مورد نیاز را در گستره آبخوان ارائه کند. طراحی شبکه‌های کمّی و کیفی آبخوان دارای ضوابطی است که این ضوابط خود بستگی به هدف مطالعه دارد. از آنجا که بیشتر منابع آب زیرزمینی در سطح کشور را آبخوان‌های آزاد تشکیل می‌دهند و مطالعات منظمی هم که تاکنون انجام گرفته (مانند ایجاد شبکه اندازه‌گیری تراز آب زیرزمینی) بیشتر در مورد این آبخوان‌ها است، لذا در این تحقیق طراحی شبکه چاه‌های آبخوان آزاد مورد توجه قرار گرفته است. تراکم نقاط اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی در واحد سطح آبخوان بر حسب اهداف از پیش تعیین شده مطالعات، می‌تواند متفاوت باشد. در حال حاضر تراکم‌های مورد استفاده در مطالعات آبهای زیرزمینی به صورت یکی از موارد ذیل است. در تراکم زیاد برای شبکه اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی حدود 10 حلقه چاه اندازه‌گیری سطح آب در هر 100 کیلومتر مربع در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که با توجه به شرایط متفاوت هیدروژئولوژیک حاکم بر آبخوان و مشکلات موجود، همیشه تراکم زیاد مناسبترین تراکم نخواهد بود. در تراکم قابل قبول تجارب حاصل از مطالعات آبهای زیرزمینی در ایران و همچنین مشکلات در انتخاب محل و حفاری چاه‌های اندازه‌گیری نشان می‌دهد که برای بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی یک آبخوان نیاز به تراکم زیاد نبوده و با تراکم کمتر، به ویژه برای آبخوانهای

1. Classical NP-hard Combinatorial Problem
2. Rounding

Archive of SID
www.SID.ir

با گسترش زیاد می‌توان به آنچه که در هدف ذکر شده بیان گردید، نایل شد. بنابراین تراکم مناسب و قابل قبولی که پیشنهاد می‌شود، 4 حلقه چاه مشاهده‌ای برای هر 100 کیلومتر مربع آبخوان است. به عبارت دیگر در هر شبکه 25 کیلومتر مربعی باید یک حلقه چاه در نظر گرفته شود. در این حالت فاصله چاه‌ها از یکدیگر به طور متوسط حدود 5 کیلومتر در نظر گرفته می‌شود (حسینی عرب، 1381). البته شایان ذکر است که ضوابط طراحی شبکه پایش کمّی آب زیرزمینی بیشتر در اضافه نمودن چاه، در نقاط تنک شبکه مورد توجه قرار می گیرد که این مورد، موضوع این مقاله نیست و بنابراین به آنها اشاره نشده است.

3-2- روش انجام کار

تابع هدف مسأله بهینه‌سازی طراحی شبکه پایش به صورت حداقل نمودن فقدان داده کل در شبکه کاهش یافته یا بهینه شده تعریف شد که به وسیله جذر میانگین مربع خطاهای تخمین[1] در هر چاه به شرط داشتن یک تعداد ثابت از چاه‌های پایش، کمّی گردید. تابع هدف مسأله بهینه‌سازی طراحی شبکه پایش آب زیرزمینی در این تحقیق، به صورت روابط (1) و (2) ارائه شد (Li and Chan Hilton., 2006).

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

$$m = S_{goal} \quad (2)$$

در روابط فوق m تعداد چاه‌های پایش حذف شده، $WT_{act,i}$ تراز آب زیر زمینی واقعی چاه حذف شده i، $WT_{est,i}$ تراز آب زیر زمینی تخمین زده شده چاه حذف شده i بر اساس چاه‌های باقی‌مانده و S_{goal} تعداد مطلوب چاه‌های حذف شده است که بر طبق بودجه در دسترس و یا سطح اطلاعات مورد انتظار تعیین می‌شود. قابل انتظار است که شبکه‌های پایش بهینه مورد قبول (معتبر)، دارای مقادیر نسبتاً پایینی از جذر میانگین مربعات خطا باشند. با حذف تعداد خیلی بیشتری از چاه‌های پایش و یا حذف چاه‌هایی که اضافه نیستند (با توجه به شبکه کلی پایش)، مقدار جذر میانگین مربع خطا به دلیل افزایش فقدان داده، افزایش می‌یابد. در این تحقیق از روش زمین آماری کریجینگ برای تخمین تراز آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای استفاده شد.

در این بخش از تحقیق، ابتدا کد برنامه‌ای برای حل مسأله فروشنده دوره گرد با استفاده از روش الگوریتم اجزای جمعی نوشته شد و سپس به منظور ارزیابی صحت آن، برنامه با تعدادی از مثال‌های مرجع کتابخانه مسأله فروشنده دوره گرد[2] اجرا شده و نتایج آن با مقادیر بهینه مثالهای مرجع مقایسه گردید. همان‌طور که در جدول 1 دیده می‌شود عملکرد کد برنامه نوشته شده برای حل مسأله فروشنده دوره‌گرد رضایتبخش بوده و به این ترتیب می‌توان از آن برای حل مسأله این تحقیق استفاده کرد.

جدول 1 درصد انحراف از مقدار بهینه الگوریتم PSO بسط یافته در این تحقیق برای حل TSP

نام مثال مرجع (Lee and Ellis., 1996)	درصد متوسط انحراف حاصل شده در این تحقیق
Br17	0/0871
Eil51	1/9536
Berlin52	2/122
Eil76	4/6151

الگوریتم گسسته اجزای‌جمعی برای حل مسأله طراحی شبکه پایش آب زیرزمینی در ذیل شرح داده شده است.

1- به تعداد چاه‌های مشاهده‌ای و به طور تصادفی ذرات گروه تولید می‌شوند. نقطه شروع هر ذره به طور تصادفی انتخاب شده و یک توالی تبادلی[3] به نام سرعت به آنها تعلق می‌گیرد. آماده‌سازی ذرات بر اساس نسخه تطبیقی تصادفی ابتکاری نزدیکترین همسایگی[4] انجام گردید (Bellmore and Nemhauser., 1968).

2- در ابتدای حل میزان احتمالات دخیل در سرعت ذرات تعریف می‌شود. سپس الگوریتم بر اساس اپراتور سرعت که به طور تصادفی انتخاب می‌شود، به تصحیح موقعیت ذره پرداخته و در آخر احتمالات بهنگام می‌شوند. در ابتدا یک چاه به طور اتفاقی انتخاب می‌شود، سپس دیگر چاه‌ها در

1. Root Mean Square Error

2. TSPLIB
3. Swap Sequence
4. Random Adaptive Version of the Heuristic Nearest Neighbor

www.SID.ir

هـر گـام بـه حـل اضـافه مـی‌شـوند (Bellmore and Nemhauser., 1968).

3- ترتیبی که ذره به بازدید از چاه‌ها می‌پـردازد، بـه طـور تصادفی بر اساس سه نوع از اطلاعاتی کـه یـک ذره بـه آن دسترسـی دارد، تعیـین مـی‌شـود. ایـن اطلاعـات شـامل اطلاعـات خـود ذره، اطلاعـات بهتـرین مـوقعیتی کـه ذره تاکنون بدست آورده و اطلاعات بهترین موقعیت سراسـری (و یا در همسایگی) یک ذره می‌باشد. هـر ذره تنهـا تعـداد مشخصی از چاه‌ها را بازدید می‌کند. چاه‌های بازدیـد شـده جزو چاه‌های منتخـب بـرای حـذف از شـبکه پـایش قـرار می‌گیرند. بـرای هـر عضـوی از جمعیـت، یـک همسـایگی اجتمـاعی کـه فقـط شـامل بهتـرین ذره سراسـری اسـت، تعریف می‌شود.

در ایـن تحقیـق از فراینـدهـای جسـتجوی موضـعی Lin-Kernighan و جستجوی سراسـری Path-Relinking (بـه عنوان اپراتورهای سرعت)، برای مسأله بهینه‌سازی گسسته استفاده شده است (Goldbarg, 2006). جستجوی موضعی یک روش بهینه‌سازی متداول است که بـا یـک حـل اولیـه شروع شده و با انجام جستجو برای بدست آوردن یک حـل مناسبتر (در یک همسایگی تعریف شده) ادامه می‌یابـد. در صورتی که حل بهتری پیدا شـد، آن حـل جـایگزین حـل قبلی شده و فرایند جستجو در همسایگی آن دوباره شـروع می‌شود. این مراحل ادامه می‌یابد تا اینکه بهبودی در حـل کنونی ایجاد نشود (Aarts et al., 1997). اولین گزینه برای حرکت ذره، حرکت در مسیر خودش می‌باشـد کـه مبـین انجام یک فرایند جستجوی موضعی است. در ایـن تحقیـق از فرایند همسایگی Lin-Kernighan استفاده شـده اسـت (Goldbarg et al., 2006). الگوریتم Lin-Kernighan یکی از مؤثرترین روش‌های تولیـد حـل‌هـای بهینـه یـا نزدیـک بهینه در مسایل متقارن TSP می‌باشـد. بـالغ بـر طـی 15 سال (1973 تا 1989)، الگوریتم جسـتجوی موضـعی LK در راس روش‌های ابتکـاری بـرای حـل TSP قـرار داشـت. Path-Relinking یک روش تقویتی[1] است که ایـده آن در ابتدا بوسیله گلـور و همکـاران در سـال 1963 بـه منظـور طراحی یک روش برنامه‌ریزی برای رسیدن به تصمیم‌هـای بهبودیافته در مسایل برنامه‌ریـزی تولیـد کارگـاهی[2] ارائـه گردید (Glover et al., 2000). برای حرکت ذره از موقعیت خـودش بـه سـمت موقعیـت دیگـر (Pbest یـا Gbest)، از فرایند Path-Relinking بـین دو حـل اسـتفاده مـی‌شـود (Goldbarg et al., 2006). استراتژی Path-Relinking بـر اساس تولید یک مسیر بین دو حل و ایجاد یک حل جدید استوار می‌باشد. با داشتن یک نقطه مبدا (x_s) و یک حـل مقصد (x_t)، یک مسیر از x_s به x_t برقرار مـی‌شـود کـه این مسیر از مقادیر متوالی $x_s, x_s(1), x_s(2), ..., x_s(r) = x_t$ تشکیل می‌یابـد، بـه طـوری کـه $x_s(i+1)$ از x_s بدسـت می‌آید. با در نظر داشتن این خاصیت بود که محققان، یک راه طبیعی برای به انجام رسیدن این توالی را با انجام یـک عملکرد Path-Relinking بین دو حل میسر دانسته بودند. سرعت مورد استفاده برای حرکت یک ذره از موقعیت مبدا بـه سـمت موقعیـت مقصـد بـه صـورت عملکـرد Path-Relinking تعریف می‌شود.

4- در این مرحله یک ذره تصمیم مـی‌گیـرد کـه از میـان چاه‌های موجود کدام یک را مورد بازدید قرار بدهد. در این مطالعه از مقدار خطای نسبی تخمین در هـر چـاه و جـذر میانگین مربع خطای کل شبکه پایش برای تنظیم حرکات ذرات استفاده می‌شود. با ارزیابی خطای نسبی تخمـین بـه ذرات این امکان داده می‌شود که در مورد هر چاه جداگانـه تصمیم‌گیری نمایند. خطاهای نسبی تخمـین چـاه کنـونی (i) و همسایگان چاه مورد نظـر محاسـبه مـی‌شـود. فـرض می‌شود که چاه j یکی از چاه‌هـای منتخـب مـی‌باشـد کـه توسط ذره‌ای که در چاه i قرار گرفته اسـت، مـورد بازدیـد قرار می‌گیرد. میزان خطا بـر اسـاس معادلـه (3) محاسـبه می‌شود. در این معادله میزان سـطح ایسـتابی تخمینـی از طریق روش زمین آمـاری کریجینـگ محاسـبه مـی‌شـود. خطای نسبی تخمین چاه منتخب j بـه صـورت رابطـه (3) تعیین می‌شود.

$$REE_j = \frac{\left|WT_{est,i} - WT_{act,i}\right|}{\min\left(WT_{est,i}, WT_{act,i}\right)} \qquad (3)$$

5- گام‌های 3 و 4 تا اتمام تعداد چاه‌های مورد نظـر بـرای بازدید (مستعد حذف از شبکه) ادامه می‌یابد. این مرحله تا حل کامل مسأله بهینـه‌سـازی طراحـی شـبکه پـایش آب زیرزمینی به طور مدام تکرار می‌شود.

6- بعد از اینکه یک ذره تعداد از پـیش تعیـین شـده‌ای از

1. Intensification Technique
2. Job shop scheduling

www.SID.ir

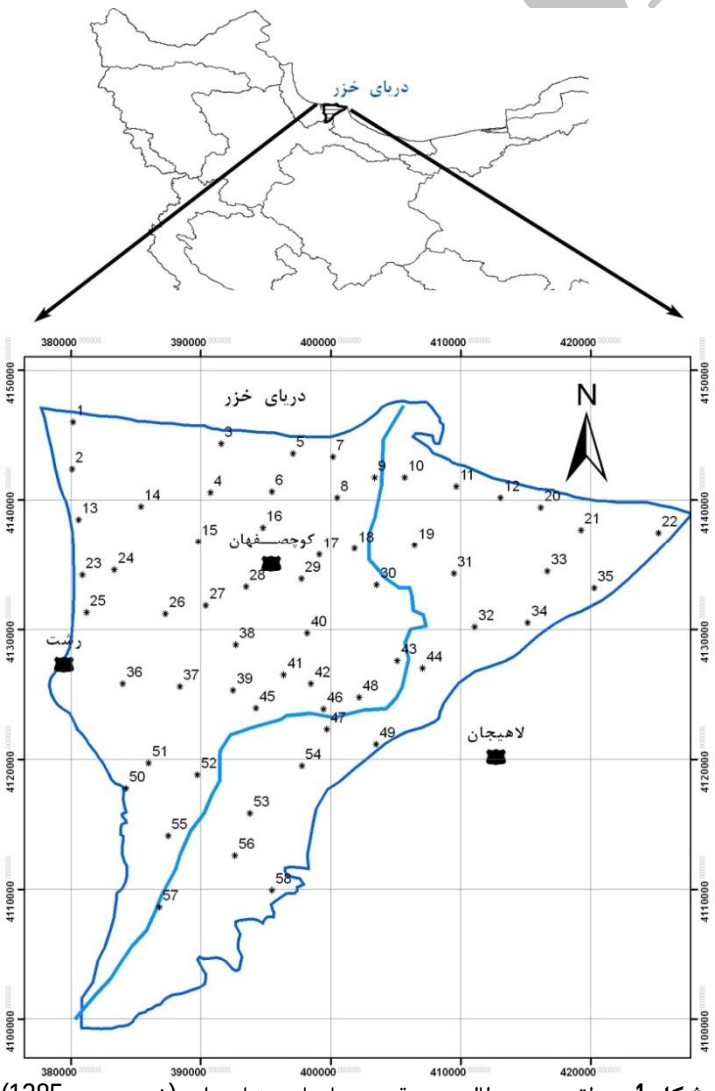
چاه‌ها را مورد بازدید قرار داد، میزان فقدان داده‌ای کل شبکه کاهش یافته (بهینه شده) محاسبه می‌شود. فقدان داده‌ای ناشی از تخمین مقادیر سطح ایستابی چاه‌های حذف شده بر اساس اطلاعات چاه‌های باقی‌مانده می‌باشد. هدف نهایی از بهینه‌سازی شبکه پایش، کاهش میزان فقدان کل داده می‌باشد که به وسیله جذر میانگین مربع خطای سطوح ایستابی تخمین زده شده چاه‌های حذف شده به کمیت درآورده می‌شود.

7- گامهای 2 تا 5 تکرار می شود تا اینکه تمام ذرات تعداد چاه‌های مورد نظر برای بازدید را کامل نمایند. در این صورت یک تکرار انجام شده است.

8- برای انجام تکرار بعدی به گام اول بر گشته، فرایند بعد از بازدید تعداد چاه‌های مورد نظر، خاتمه می یابد.

2-4- منطقه مورد مطالعه

دشت آستانه-کوچصفهان در استان گیلان و بر روی مخروط افکنه رودخانه سپیدرود تشکیل شده که مساحت آن حدود 1100 کیلومتر مربع است. مرزهای سطحی این دشت، دریای خزر و دلتاهای رودخانه سپیدرود در قسمت شمال، بازشدگی مخروط افکنه سپیدرود به جلگه گیلان در جنوب، دشت لاهیجان-چابکسر در شرق و دشت فومنات در غرب می‌باشد. طول جغرافیایی محدوده از ´12 °40 تا ´05 °50 و عرض آن از ´7 °37 تا ´25 °37 نوسان دارد. شکل 1 منطقه مورد مطالعه و موقعیت آن را در استان گیلان نشان می‌دهد (خورسندی، 1385).



شکل 1 منطقه مورد مطالعه و موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای (خورسندی، 1385)

www.SID.ir

2-5- پردازش داده‌ها

داده‌های اندازه‌گیری ماهانه تراز آب زیرزمینی در دشت آستانه-کوچصفهان در سال آبی1382 برای پردازش مورد استفاده قرار گرفت. برای تعیین نیم‌تغییرنما[1] و آنالیزهای مکانی مورد نیاز در آبخوان، نرم‌افزار SURFER 8.0 انتخاب شد. بعد از کنترل و آزمایش داده‌ها، روش کریجینگ عمومی با تغییرنمای تئوری نمائی[2] بهترین برازش را نشان داد. پردازش اطلاعات در یک دستگاه پنتیوم با سرعت 1/83 گیگا هرتز، 768 مگا بایت حافظه مجازی و در سیستم عامل ویندوز XP انجام شد. کد برنامه بهینه‌سازی مورد استفاده در این مقاله در برنامه MATLAB 7 نوشته شد.

3- نتایج و بحث

نتایج نشان داد که الگوریتم بسط یافته در این تحقیق در حل مسأله بهینه‌سازی طراحی شبکه پایش موثر و کارا بوده و تنها نیازمند 2850 بار ارزیابی تابع هدف (2850=50×57) می‌باشد. این به طور معنی‌داری کمتر از 10^{13} × 2/205798146 ارزیابی است که در سرشماری کامل برای حل حالت 42 چاهه لازم است.

الگوریتم بسط یافته به طور موفقیت‌آمیزی حل‌های امکان‌پذیر را برای حالات 54 تا 42 چاه باقی‌مانده، شناسایی نموده و با نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک (که در کاربردهای مهندسی استفاده بسیار عمومی‌تری یافته است) قابل مقایسه بود. مقادیر RMSE بهینه برای حل‌های پیدا شده برای حالات مختلف تعداد چاه‌های باقیمانده نشان می‌داد که وقتی تعداد چاه‌های باقیمانده کاهش می‌یابد، مقدار RMSE به طور غیرخطی افزایش می‌یافت (شکل 2).

خطوط تراز آب زیرزمینی شبکه بهینه‌شده در حالات 54، 48 و 45 چاه مشاهده‌ای رسم گردیده و ارزیابی شد. نتایج نشان داد که چاه‌ها عمدتاً از مناطقی حذف شده‌اند که تجمعی از چاه‌ها در آن مناطق دیده می‌شد. اختلاف بین خطوط تراز نتیجه شده از شبکه بهینه‌شده و خطوط تراز اصلی برای حالات 54 و 48 چاهه جزئی بودند. در حالت آخر یعنی حالت 42 چاهه که تقریبا به میزان 30 درصد کاهش در تعداد چاه‌های موجود در شبکه وجود داشت، تنها برخی از قسمت‌هایی که دارای فقدان داده بودند، دیده می‌شد. در کل، هر دو مجموعه خطوط خیلی شبیه بهم بوده و فقط اختلاف‌های جزئی در برخی از مناطق کوچک دیده می‌شد. این موضوع نشان می‌دهد که برای این مطالعه، حدود 30 درصد کاهش در تعداد چاه‌ها معقول و منطقی به نظر می‌رسد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی انجام شده و همچنین مقایسه خطوط تراز آب زیرزمینی در حالت اصلی و بعد از حذف چاه‌های منتخب در جدول 2 و شکل‌های 3 تا 5 نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقدار جذر میانگین مربع خطای الگوریتم ژنتیک در حالت 42 چاه باقی‌مانده برابر 0/2025 و برای الگوریتم اجزای جمعی برابر 0/3222 شده است. الگوریتم ژنتیک در این حالت نسبت به الگوریتم اجزای جمعی بسط یافته در این تحقیق از نظر کیفیت حل حدود 60 درصد بهتر عمل کرده است.

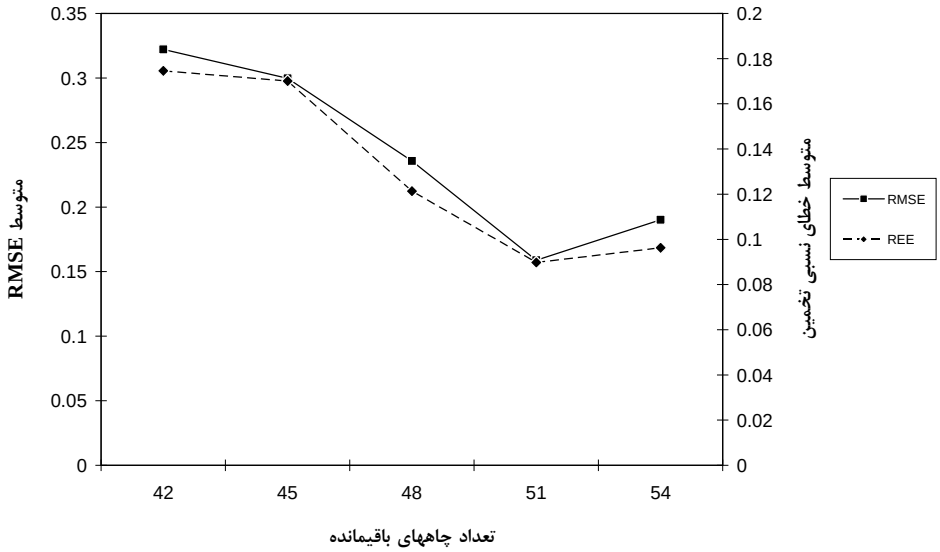
همچنین در جدول 3 ملاحظه می‌شود که با وجود برتری نامحسوس الگوریتم ژنتیک در کیفیت حل (موفقیت بیشتر در بدست آوردن برخی از حل‌های ضعیف نزدیک به بهینه)، الگوریتم اجزای جمعی از راندمان اجرایی بالاتری برخوردار است. به عبارت دیگر الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله مورد نظر در این تحقیق نیازمند صرف وقت بیشتری بود.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با توجه به اینکه به طور معمول بهینه‌سازی شبکه پایش، یک مسأله ترکیبی غیرخطی است، از روش-های بهینه‌سازی فرا کاوشی استفاده گردید. در این تحقیق یک الگوریتم بهینه‌سازی گسسته اجزای جمعی که از نوع الگوریتم‌های جدید و هوشمند می‌باشد، در شبکه پایش آبخوان آستانه-کوچصفهان استان گیلان که شامل 57 چاه مشاهده‌ای می‌باشد، به کار برده شد. هدف از انجام بهینه-سازی، تعیین یک ترکیب بهینه (کاهش یافته) از میان شبکه اصلی چاه‌های مشاهده‌ای بود، به طوری که انتظارات طرح را از نظر میزان فقدان داده‌ای کل برآورده کند.

1. Semi-Variogram
2. Exponential

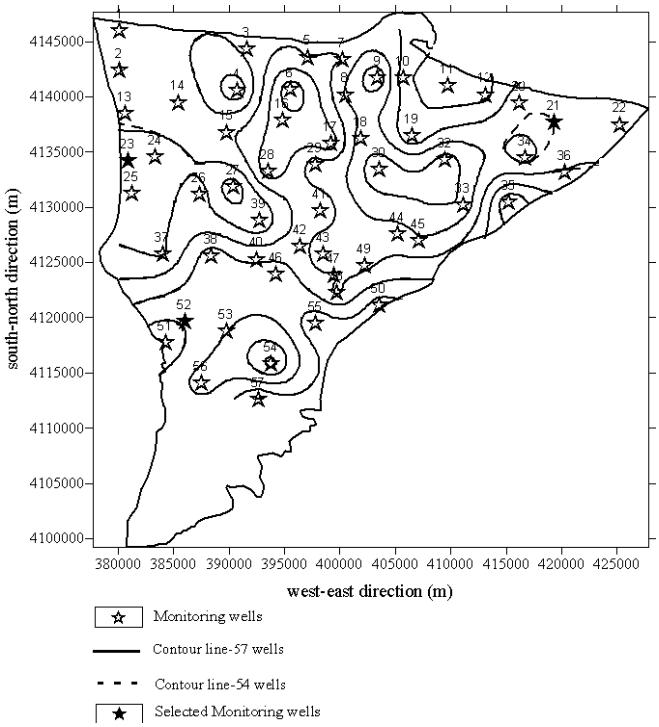
www.SID.ir



شکل 2 نمایش تغییرات مقدار RMSE در برابر کاهش تعداد چاه‌های مشاهده‌ای

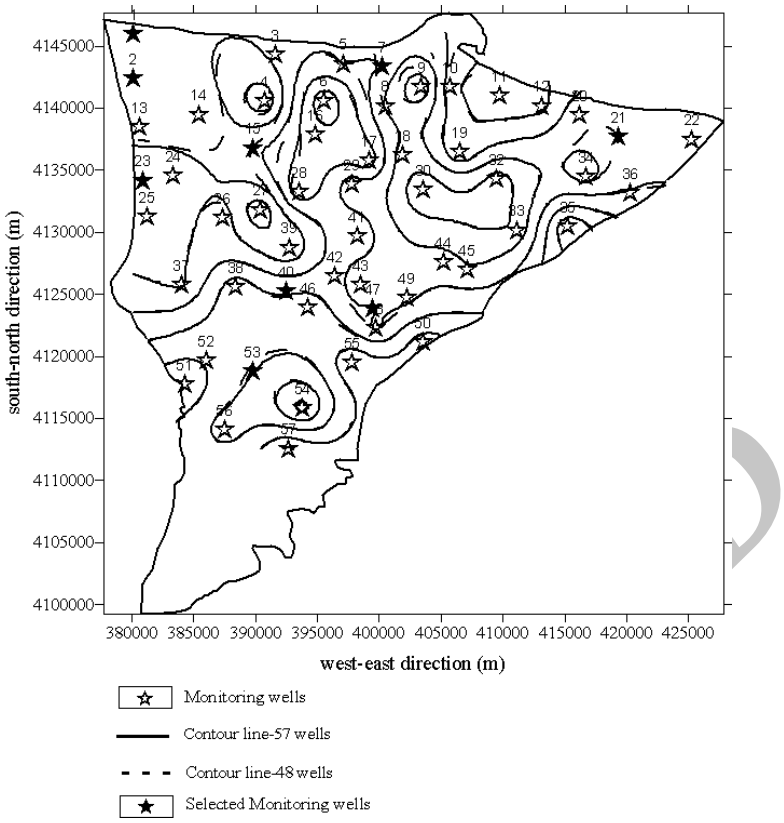
جدول 2 نتایج حاصل از بهینه‌سازی انجام شده توسط الگوریتم اجزاری جکعی در مقایسه با الگوریتم ژنتیک

تعداد چاه‌های باقی‌مانده	چاه‌های حذفی حاصل از الگوریتم اجزای جمعی	مقدار RMSEالگوریتم اجزای جمعی	مقدار RMSE الگوریتم ژنتیک
54	21،23،52	0/1902	0/1044
51	۱۳،۲۱،۴۴،۴۷،۵۲،۵۳	0/1589	0/1224
48	۱،۲،۷،۱۵،۲۱،۲۳،۴۰،۴۷،۵۳	0/2357	0/1773
45	۳،۵،۱۳،۱۵،۲۱،۲۲،۳۶،۴۴،۴۷،۴۹،۵۲،۵۳	0/2997	0/1650
42	۱،۵،۷،۱۳،۱۵،۲۱،۲۲،۲۳،۳۶،۴۰،۴۲،۴۴،۴۷،۵۲،۵۳	0/3222	0/2025

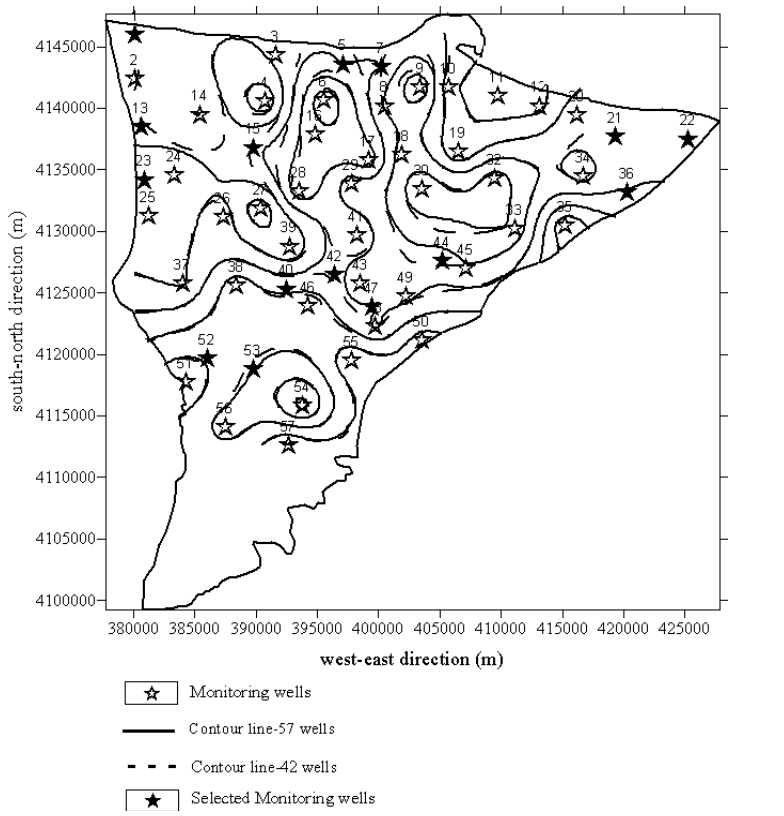


شکل 3 مقایسه منحنی‌های تراز سطح ایستابی در حالت حذف 3 چاه از شبکه مشاهده‌ای

www.SID.ir



شکل 4 مقایسه منحنی‌های تراز سطح ایستابی در حالت حذف 9 چاه از شبکه مشاهده‌ای



شکل 5 مقایسه منحنی‌های تراز سطح ایستابی در حالت حذف 15 چاه از شبکه مشاهده‌ای

www.SID.ir

جدول 3 زمان پردازش اطلاعات صورت گرفته توسط الگوریتم های مورد استفاده

تعداد چاه‌های باقی‌مانده	زمان پردازش اطلاعات الگوریتم ژنتیک (ثانیه)	زمان پردازش اطلاعات الگوریتم اجزای جمعی (ثانیه)	زمان پردازش اطلاعات توسط روش سرشماری کامل (ثانیه)	زمان پردازش اطلاعات توسط روش سرشماری کامل
54	32/4219	17/2656	332/86484	تقریباً 5 دقیقه
51	61/4844	32/9062	782863/6496	تقریباً 9 روز
48	88/4219	47/5312	279117300/1	تقریباً 9 سال
45	112/828	60/5312	28000565243	تقریباً 888 سال
42	136/6094	72/2344	1/05731E+12	تقریباً 33527 سال

در این مطالعه برای مقادیر تخمینی تراز آب زیرزمینی نقاط، از روش زمین‌آماری کریجینگ استفاده شد. با کم کردن تعداد چاه‌ها در شبکه پایش، مقدار جذر میانگین مربع خطا و همچنین خطای نسبی تخمین در شبکه بدست آمد. نتایج حاصل از شبکه در حالتهای 54، 48 و 42 چاه باقی مانده با نتایج شبکه اصلی چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان مورد مطالعه مقایسه گردید. به دلیل اینکه فضای جستجوی حل مسأله با زیاد شدن تعداد چاه‌های مستعد حذف بسیار عظیم می‌گردید (بالغ بر 22 تریلیون)، نتایج حاصل با الگوریتم ژنتیک مقایسه گردید. در مقایسه با الگوریتم ژنتیک، حل‌های حاصل از الگوریتم اجزای جمعی از راندمان بالاتری برخوردار بوده و دارای سرعت همگرایی سریعتری بود. از نظر کیفیت الگوی RMSE و نیز مقایسه خطوط تراز تخمینی با خطوط تراز اصلی شبکه، دو الگوریتم قابل مقایسه بوده و توزیع چاه‌های مستعد حذف، موید این مطلب بود.

به عبارت دیگر ملاحظه شد که با وجود برتری نامحسوس الگوریتم ژنتیک در کیفیت حل (موفقیت بیشتر در بدست آوردن برخی از حل‌های ضعیف نزدیک به بهینه)، الگوریتم اجزای جمعی از راندمان اجرایی بالاتری برخوردار بوده است. به عبارت دیگر الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله مورد نظر در این تحقیق نیازمند صرف وقت بیشتری بود. در این تحقیق سعی گردید که با حذف تعداد از پیش تعیین شده‌ای از چاه‌های مشاهده‌ای، فقدان داده‌ای کل حاصل از بهینه‌سازی (در هر کدام از حالتهای ارزیابی) در حد قابل قبول باقی بماند. روش بسط یافته در این تحقیق در واقع اتخاذ استراتژی‌های زمین‌آماری بود که با یک الگوریتم بهینه‌سازی قوی (الگوریتم اجزای جمعی) ترکیب شده بود. این روشها قادرند تا حل‌های بهینه سراسری را شناسایی کنند. بنابراین نتیجه گرفته می‌شود که الگوریتم پیشنهادی در آبخوان‌های بزرگ مقیاس، می‌تواند به طور مؤثری چاه‌های پایش مستعد حذف را شناسایی کنند.

5- تقدیر و تشکر

لازم است که از زحمات و راهنمایی‌های Pr. Givanaldo de Rocha که نویسندگان را در انجام الگوریتم بهینه‌سازی گسسته اجزای جمعی این تحقیق یاری نمودند، تشکر و قدردانی شود. در ضمن نویسندگان از شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان و معاونت مطالعات پایه منابع آب آن شرکت که اطلاعات و آمار مورد نیاز این تحقیق را در اختیار قرار دادند، تشکر می‌نمایند.

6- فهرست علایم

تعداد چاههای پایش	m
خطای نسبی تخمین	REE
جذر میانگین مربعات خطا	$RMSE$
تعداد مطلوب چاهه	S_{goal}
تراز آب زیرزمینی واقعی چاه	WT_{act}
تراز آب زیرزمینی تخمینی چاه	WT_{est}
تابع هدف	Z

7- منابع

حسینی عرب، ع.م. 1381. دستور العمل طراحی، پایش و کنترل کمّی و کیفی منابع آب زیرزمینی کشور، وزارت نیرو، سازمان مدیریت منابع آب ایران، معاونت پژوهش،

Archive of SID
www.SID.ir

دفتر مطالعات پایه منابع آب.

خورسندی، ا. 1385. بررسی و تکمیل مطالعات بیلان هیدروکلیماتولوژی دشت آستانه-کوچصفهان، شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان.

Aarts, E., and Lenstra, J.K. (1997). *Local Search in Combinatorial Optimization*. John Wiley & Sons, Chichester, England.

Bellmore, M., and Nemhauser, G.L. (1968). "The traveling salesman problem: A survey". Operations Research, 16: 538-582.

Chau, K., (2004). "River stage forecasting with particle swarm optimization", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, LNAI 3029: 1166-1173.

Cieniawski, S.E., Eheart, J.W., and Ranjithan, S., (1995). "Using genetic algorithm to solve a multiobjective groundwater monitoring problem". Water Resour. Res. 31 (2): 399-409.

Clerc, M., (2004). "Discrete particle swarm optimization, illustrated by the traveling salesman problem". In B. V. Babu & G. C. Onwubolu (Eds.), New optimization technique in engineering, Berlin: Springer, 219-239.

Clerc, M., (2006). *Particle swarm optimization*. London: ISTE.

Glover, F., Laguna, M., and Mart, R. (2000). "Fundamentals of scatter search and path relinking". Control and Cybernetics, 29(3): 653-684.

Goldbarg, E.F., Souza, G.R., and Goldbarg, M.C. (2006). "Particle swarm for the traveling salesman problem'. Springer-Verlag Berlin, LNCS 3906: 99-110.

Izquierdo, J., Montalvo, I., Perez, R., and Fuertes, V.S. (2008). "Design optimization of wastewater collection networks by PSO", Computers and Mathematics with Applications, 56(3): 777-784.

Jousma, G. (2008). "Guideline on groundwater monitoring for general reference purposes". International Groundwater Resource Assessment center. International Working Group I, GP 2008-1. Utrecht. p. 165.

Li, Y., and Chan Hilton, A.B., (2006). "Reducing spatial sampling in long-term ground-water monitoring using ant colony optimization". International Journal of Computational Intelligence Research 1 (1): 19-28.

Montalvo, I., Izquierdo, J., and Perez, R. (2008). "Particle swarm optimization applied to the design of water supply systems", Computers and Mathematics with Applications, 56(3): 769-776.

Moraglio, A., Di Chio, C., and Poli, R. (2007). "Geometric particle swarm optimization". Proceedings of European Conference on Genetic Programming (EuroGP), Berlin: Springer, 125-136.

Nielsen, D. (1991). *Practical Handbook of Groundwater Monitoring*, Lewis Publisher, Chelsea Michigan, USA, Briefing note Series. CRC Press. p. 728.

Nunes, L.M., Cunha, M.C., and Ribeiro, L., (2004). "Groundwater monitoring network optimization with redundancy reduction". Journal of Water Resource Planning and Management 130 (1): 33-43.

Poli., R. Kennedy., J. and Blackwell., T. (2007). "Particle swarm optimization. An overview". Swarm Intelligence. Berlin: Springer, 33-57.

Reed, P.M., Minsker, B.S., and Valocchi, A.J., (2000). "Cost-effective long-term groundwater monitoring design using a genetic algorithm and global mass interpolation". Water Resour. Res. 36 (12): 3731 – 3741.

Suribabu., C.R., and Neelakantan., T.R. (2006). "Design of water distribution networks using particle swarm optimization". Urban Water Journal. 3(2): 111-120.

Tuinhof, A. (2002). "Groundwater monitoring requirements for managing aquifer response and quality threats". Sustainable Groundwater management: Concept and Tools, GW Mate, Briefing Report. No, 9. World Bank.

Wegley, C., Eusuff, M., and Lansey, K., (2000). "Determining pump operations using particle swarm optimization". In: Proceedings of Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management, Minneapolis, MN, July 30-Aug 2, 2000. ASCE, Reston, VA.

Wu, J., Zheng, C., and Chien, C.C., (2005). "Cost-effective sampling network design for contaminant plume monitoring under general hydrogeological conditions". Journal of Contaminant Hydrology 77: 41-65.

Archive of SID

www.SID.ir