



دانشگاه شیراز، دانشکده کشاورزی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و پنجم، شماره سوم، ۱۳۹۷

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2018.14879.2994

حداقل‌سازی تعداد چاه‌های اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی با استفاده از زمین‌آمار و بهینه‌سازی (مطالعه موردی: دشت دزفول - اندیمشک)

*علی رئیسی عیسی‌آبادی^۱، حمیدرضا غفوری^۲ و محسن مسلم‌زاده^۳

استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید چمران اهواز،

تک‌کارشناس ارشد منابع آب، سازمان آب و برق خوزستان

تاریخ دریافت: ۹۷/۱/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۳/۲۹

چکیده

سابقه و هدف: آب‌های زیرزمینی هم به دلیل کمیت و هم به دلیل کیفیت جزء باارزش‌ترین منابع آب به‌شمار می‌روند. اندازه‌گیری تراز سطح آب زیرزمینی یکی از گام‌های اساسی و ضروری مطالعات آب زیرزمینی محسوب می‌شود. از آنجا که اندازه‌گیری داده‌ها در نقاط محدودی انجام می‌شود و از طرفی این اندازه‌گیری‌ها باید به سطح تعمیم داده شود، تعیین محل‌های بهینه اندازه‌گیری شبکه امری مهم به‌شمار می‌رود. بر همین اساس در مطالعه حاضر با هدف کاهش تعداد چاه‌های اندازه‌گیری (چاه‌های مشاهده‌ای)، تعدادی از چاه‌ها به‌گونه‌ای حذف گردید که چاه‌های باقی‌مانده یک ترکیب بهینه داشته باشند.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش دشت دزفول - اندیمشک واقع در شمال استان خوزستان به‌عنوان مطالعه موردی مبنای کار قرار گرفت. روش کریجینگ که بهترین تخمین‌گر خطی ناریب به‌شمار می‌رود برای میان‌یابی مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده ۷۶ چاه مشاهده‌ای مورد مطالعه در این دشت، یک واریوگرام تئوری بر داده‌های واریوگرام تجربی برآزش داده شد. سپس به‌منظور یافتن ترکیب بهینه چاه‌ها از یک روش بهینه‌سازی تحت عنوان الگوریتم تابو (که یک الگوریتم فراکاوشی محسوب می‌شود) بهره گرفته شد. بدین‌منظور دو برنامه کامپیوتری شامل GSLIB برای مدل کردن روش کریجینگ و MATLAB برای انجام محاسبات الگوریتم جستجوی تابو مورد استفاده قرار گرفتند. با اتصال دادن این دو برنامه و فراهم آوردن شرایطی برای تبادل اطلاعات میان آن‌ها، یک مدل تحت عنوان مدل بهینه‌ساز به‌گونه‌ای حاصل شد تا قابلیت بهینه‌سازی شبکه اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی فراهم گردد. توزیع چاه‌ها به‌گونه‌ای صورت می‌گیرد که واریانس خطای تخمین کریجینگ در محدوده مورد مطالعه حداقل گردد.

یافته‌ها: مدل بهینه‌ساز حاصل برای پنج حالت کاملاً متفاوت اجرا گردید. در حالت‌های اول تا سوم که هدف آن صرفاً صحت‌سنجی مدل بوده، به‌ترتیب انتخاب بهینه یک، دو و سه چاه مشاهده‌ای ارائه شد که با مقایسه با روش جستجوی کامل، صحت کارکرد مدل مورد تأیید قرار گرفت. در حالت‌های چهارم و پنجم، انتخاب بهینه ۵۰ و ۶۰ چاه مشاهده‌ای از میان ۷۶ چاه موجود ارائه گردید که تراز سطح آب زیرزمینی برای این حالت‌ها مورد مقایسه قرار گرفت و بیانگر تطابق خوب نتایج در مقایسه با تراز سطح آب زیرزمینی ناشی از کل چاه‌ها (۷۶ چاه) می‌باشد.

* مسئول مکاتبه: ali_raeisi@agr.sku.ac.ir

نتیجه‌گیری: با توجه به این‌که واریوگرام منطقه یک واریوگرام همسان‌گرد بوده، توزیع چاه‌ها نیز در امتدادهای مختلف به‌طور یکنواخت بوده، این نتیجه بر اساس نتایج حالت‌های اول تا سوم که تعداد چاه‌ها کم می‌باشد به‌خوبی ملموس می‌باشد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی ۵۰ و ۶۰ چاه مشاهده‌ای بدون هیچ‌گونه دخالتی در طی فرایند بهینه‌سازی توسط مدل حاضر و به‌طور خودکار ارائه شده که مقایسات تراز سطح آب زیرزمینی دقت نتایج مدل را تأیید می‌کند. همچنین نتایج بیانگر صرفه‌جویی بسیار زیاد زمان به‌واسطه استفاده از مدل حاضر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، الگوریتم جستجوی تابو، بهینه‌سازی، زمین‌آمار، شبکه اندازه‌گیری

مقدمه

آب‌های زیرزمینی بزرگ‌ترین ذخیره قابل‌دسترس آب شیرین در کره زمین را تشکیل می‌دهند (۱). با توجه به کاهش نزولات جوی و خشکسالی سال‌های اخیر و در نتیجه کمبود آب در پهنه وسیعی از کشور و افزایش میزان تقاضا برای مصارف مختلف، مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی از اهمیت و حساسیت بسیار زیادی برخوردار است. برای اعمال یک مدیریت صحیح نیاز به شناسایی، به مدل درآوردن و تخمین سطح آب زیرزمینی در دشت‌ها برای برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و استفاده بیشتر و بهتر از پتانسیل‌های آبی موجود در دشت‌ها به خوبی احساس می‌شود. از اساسی‌ترین موارد در مدیریت کمی منابع آب زیرزمینی تخمین سطح آب با استفاده از داده‌های برداشت‌شده از شبکه چاه‌های مشاهده‌ای می‌باشد. از جمله روش‌های معمول برای این منظور، استفاده از زمین‌آمار^۱ (کریجینگ^۲) است، که بهترین تخمین‌گر خطی ناریب^۳ به‌شمار می‌رود (۲). یکی از ویژگی‌های کریجینگ قابلیت تعیین خطای تخمین در قالب واریانس خطای تخمین می‌باشد. این خصوصیت شرایط تعیین محل بهینه نمونه برداری (محل بهینه چاه‌های مشاهده‌ای) را فراهم می‌سازد.

پژوهش‌ها بر اساس روش‌های زمین‌آماري علاوه بر چاه‌های مشاهده‌ای و اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی در زمینه‌های مختلف دیگری نیز انجام شده است که از جمله می‌توان کاربرد روش‌های زمین‌آماري روی تغییرات مکانی رطوبت و خصوصیات خاک، توزیع بارش و ایستگاه‌های باران‌سنجی، کیفیت آب زیرزمینی و کیفیت آب رودخانه‌ها اشاره نمود (۳ تا ۱۴).

بن‌جما و مارینو (۱۹۹۰) براساس نتایج حاصل از تخمین سطح ایستابی به روش زمین‌آمار در مراکش دریافتند که روش‌های زمین‌آماري بر روش‌های مبتنی بر آمار کلاسیک برتری دارد (۱۵). پراکاش و سینگ (۲۰۰۰) برای طراحی شبکه اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی با بهره‌گیری از کریجینگ و واریانس خطای تخمین، تعدادی چاه جدید به شبکه اضافه کردند (۱۶). کومار و رمادیوی (۲۰۰۶) روش کریجینگ را برای تخمین تراز سطح آب زیرزمینی مورد ارزیابی قرار دادند و بر اساس واریانس خطای تخمین بهترین مدل واریوگرام را شناسایی کردند (۱۷). نیکرو و همکاران (۲۰۱۰) نیز با استفاده از روش‌های مختلف زمین‌آماري برای یافتن کاربردی‌ترین روش میان‌یابی اقدام به تخمین تراز و عمق آب زیرزمینی دشت مهر استان فارس نمودند (۱۸). نوری و همکاران (۲۰۱۲)، زمانی و همکاران (۲۰۱۴) و میرزایی و همکاران (۲۰۱۶) از جمله پژوهشگران دیگری هستند که از

- 1- Geostatistics
- 2- Kriging
- 3- Unbiased

اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی دشت مهر بیابند (۲۸).
 خرم‌دل و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از الگوریتم
 اجزای جمعی گسسته^۳ جذر میانگین مربعات خطا^۴ را
 برای چاه‌های شبکه پایش آب زیرزمینی به روش
 میانبایی کریجینگ با حذف چاه‌ها حداقل نمودند
 (۲۹). میرزایی و همکاران (۲۰۱۷) با در نظر گرفتن
 سه سناریو شامل طراحی شبکه اندازه‌گیری جدید،
 بازنگری شبکه اندازه‌گیری موجود و اضافه نمودن
 تعدادی چاه مشاهده‌ای به شبکه موجود، با استفاده از
 NSGA-II^۵ شبکه اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی را
 بر اساس جذر میانگین مربعات خطا بهینه نمودند
 (۳۰).

در پژوهش حاضر، با ترکیب روش کریجینگ و
 روش بهینه‌سازی تابو^۶ (TS)، یک مدل کارآمد برای
 بازنگری شبکه اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی و
 انتخاب بهینه چاه‌های اندازه‌گیری سطح آب ایجاد
 شد. به منظور بهینه‌کردن شبکه اندازه‌گیری سطح آب
 زیرزمینی به جای استفاده از تابع میانگین مربعات خطا
 از واریانس خطای تخمین کریجینگ استفاده شد و
 سپس الگوریتم تابو که یک الگوریتم بهینه‌سازی
 قطعی^۷ است، برای این منظور به کار گرفته شد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه: منطقه انتخابی جهت
 ارزیابی و به‌کارگیری مدل تهیه شده، دشت دزفول-
 اندیمشک یا همان دشت دزفول می‌باشد که به‌عنوان
 وسیع‌ترین دشت در حوضه آبریز دز و از جمله
 دشت‌های وسیع استان خوزستان است که با وسعتی
 بالغ بر ۲۴۸۷ کیلومتر مربع از مناطق کوهستانی شمال

کریجینگ برای تخمین سطح ایستابی به‌ترتیب در
 دشت‌های ساوه- نوبران، رامهرمز و تبریز استفاده
 نمودند (۱۹، ۲۰ و ۲۱). زمانی و همکاران (۲۰۱۷) در
 یک مطالعه بر روی دشت دزفول- اندیمشک نشان
 دادند که روش کوکریجینگ در ترکیب با شبکه عصبی
 مصنوعی بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک، معیارهای
 ارزیابی مناسب‌تری را در تخمین سطح ایستابی ارائه
 می‌دهد (۲۲). در پژوهش دیگری کرد (۲۰۱۷) به
 بررسی نوسانات سطح ایستابی دشت دزفول-
 اندیمشک تحت‌تأثیر بارش، دبی و دیگر عوامل اقلیمی
 پرداخت (۲۳).

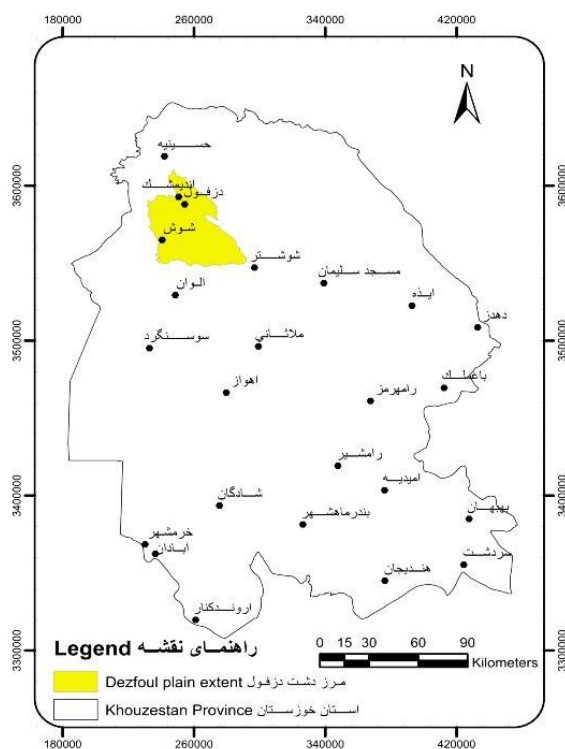
پژوهشگران متعددی نیز از روش‌های زمین‌آماري
 به‌منظور بهینه‌سازی شبکه اندازه‌گیری سطح آب
 زیرزمینی استفاده کردند از جمله لی و ایس (۱۹۹۶)
 که به مقایسه ۸ الگوریتم بهینه‌سازی در مسائل
 غیرخطی صحیح پرداختند و با اجرای آن روی یک
 مثال ساده و یک مثال پیچیده از شبکه اندازه‌گیری،
 نشان دادند الگوریتم تابو و شبیه‌سازی تبرید^۱ نسبت به
 سایر الگوریتم‌ها عملکرد خیلی بهتری دارند (۲۴).
 نونز و همکاران (۲۰۰۴) در پژوهشی به بهینه‌سازی
 شبکه مونیتورینگ آب زیرزمینی با در نظر گرفتن
 عوامل زمان و مکان پرداختند (۲۵). صفری (۲۰۰۲) از
 روش‌های زمین‌آماري جهت طراحی بهینه شبکه
 اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی به روش نمودار
 ارزیابی متقابل^۲ استفاده نمود (۲۶). دهقانی و همکاران
 (۲۰۰۹) به مقایسه سه روش شبکه عصبی مصنوعی،
 سیستم استنتاجی فازی- عصبی تطبیقی و زمین‌آمار در
 میان‌بایی سطح آب زیرزمینی در دشت قزوین پرداخته‌اند
 (۲۷). نیکرو و همکاران (۲۰۰۹) با به‌کارگیری
 کریجینگ و استفاده از سه روش کاهش، افزایش و
 تغییر محل چاه سعی نمودند تا شبکه بهینه‌ای برای

3- Particle Swarm Optimization (PSO)
 4- Root Mean Square Error (RMSE)
 5- Non-dominated sorting genetic algorithm
 6- Tabu search algorithm
 7- Deterministic

1- Simulated Annealing (SA)
 2- Cross Validation

روش میان‌یابی کریجینگ: از جمله معروف‌ترین و کاربردی‌ترین روش مورد استفاده در زمین‌آمار روش کریجینگ می‌باشد که امروزه در زمینه‌های گسترده و گوناگونی از علوم مانند معدن، زمین‌شناسی، نقشه‌برداری، محیط‌زیست، هیدرولوژی و منابع آب کاربرد دارد. کریجینگ خود به انواع مختلفی به لحاظ نحوه محاسبات و به‌کارگیری روابط تقسیم‌بندی می‌شود که معروف‌ترین آن‌ها عبارتست از: کریجینگ ساده^۱، کریجینگ معمولی^۲ و کریجینگ عمومی^۳. در این پژوهش از کریجینگ معمولی برای میان‌یابی استفاده شد که متداول‌ترین در مقایسه با دیگر انواع آن محسوب می‌شود (۱۸).

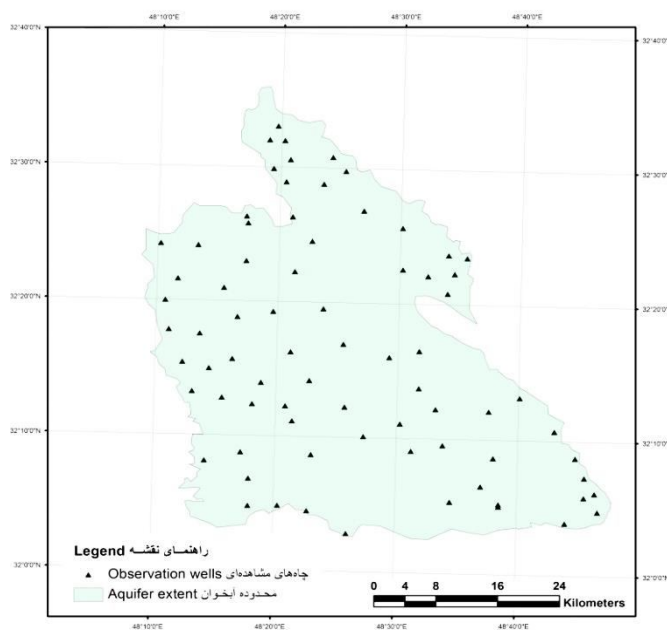
استان تا مناطق کم‌ارتفاع مرکز استان را در برمی‌گیرد. رودخانه دز از شمال وارد دشت می‌شود و با پیوستن رودخانه‌های فرعی به آن، مسیر خود را به سمت جنوب ادامه می‌دهد و در حوالی حرمله از دشت خارج می‌شود. شیب عمومی دشت از شمال به جنوب بوده و برآمدگی‌هایی در حوالی هفت‌تپه دشت را از قسمت جنوبی جلگه خوزستان جدا می‌کنند. در شکل ۱ موقعیت دشت دزفول در استان خوزستان و در شکل ۲ موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای در دشت دزفول نشان داده شده است. در این پژوهش ۷۶ حلقه چاه مشاهده‌ای موجود در دشت مذکور مورد مطالعه قرار گرفت.



شکل ۱- مرز استان خوزستان و موقعیت دشت دزفول در آن.

Figure 1. Khuzestan province extent and Dezful plain position.

- 1- Simple kriging
- 2- Ordinary kriging
- 3- Universal kriging



شکل ۲- موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای در دشت دزفول.

Figure 2. Location of Dezfoul plain observation wells.

برای محاسبه وزن نمونه‌ها از رابطه ماتریسی زیر استفاده می‌شود:

$$AX = B \quad (2)$$

$$X = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ +\mu \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \gamma_{1v} \\ \gamma_{2v} \\ \vdots \\ \gamma_{nv} \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdots & \gamma_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdots & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

ماتریس X ماتریس مجهولات است که شامل وزن‌ها و البته پارامتر لاگرانژ μ می‌باشد. ماتریس‌های A و B به ترتیب ماتریس‌های ضرایب و جواب می‌باشند که مقادیر آن‌ها با داشتن تابع واریوگرام قابل

در کریجینگ معمولی برای بیان تغییرات فضایی، از واریوگرام استفاده می‌شود و خطای مقادیر پیش‌بینی شده را با توجه به توزیع فضایی داده‌های پیش‌بینی شده، حداقل می‌کند. همانند روش متغیر وزنی، روش کریجینگ نیز برای برآورد نقطه ناشناخته به هر یک از نمونه‌های اندازه‌گیری شده وزنی را نسبت می‌دهد. روش عمومی محاسبه کریجینگ براساس رابطه زیر می‌باشد:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot z(x_i) \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

که در آن، $z^*(x_0)$ مقدار برآورد شده در نقطه x_0 و w_i وزن $z(x_i)$ مقادیر نمونه می‌باشند. وزن‌ها به درجه همبستگی بین نقاط نمونه و نقاط برآورد شده بستگی دارد و همواره جمع آن‌ها برابر با یک است. این نوع کریجینگ را خطی گویند زیرا ترکیب خطی از N داده است (۲).

منحنی تئوری واریوگرام گردید. واریوگرام‌های تئوری مختلفی شامل خطی، نمایی، کروی و گوسی بر داده‌های سطح ایستابی برازش داده شد که براساس معیارهایی چون ضریب تبیین^۲ (R^2) و مجموع مربعات باقی‌مانده^۳ (RSS)، بهترین مدل برازش داده شده بر تراز سطح ایستابی تشخیص داده شد.

الگوریتم جستجوی تابو: جستجوی تابو (TS) در سال ۱۹۸۸ توسط گلاور توسعه یافت. این الگوریتم به‌عنوان یک جایگزین اولیه برای الگوریتم‌های برمبنای جستجوی محلی بوده است که به‌سمت بسیاری از مسائل بهینه‌سازی ترکیبی^۴ در زمینه‌هایی مانند برنامه‌ریزی، تحلیل گروه‌ها، طراحی‌های فضایی و غیره سوق داده شد (۳۱). الگوریتم تابو برای پیدا کردن جواب بهینه یک مسئله، همانند سایر الگوریتم‌ها دارای مؤلفه‌ها و پارامترهای ویژه‌ای است که از آن جمله می‌توان به حافظه کوتاه‌مدت^۵، لیست تابو^۶، حافظه طولانی‌مدت^۷ و تنفس^۸ اشاره کرد.

در الگوریتم مورد استفاده در این پژوهش از سه نوع حافظه به‌ترتیب برای ممنوعیت حرکت، دورسازی و تمرکزسازی جستجو بهره گرفته شد. دو حافظه اخیر به‌ترتیب برای جلوگیری از گیر افتادن جستجو در دام اکسترمم محلی و برای جستجوی دقیق‌تر اطراف نقاط بهینه به‌کار گرفته شده‌اند. اندازه بردار حافظه‌ها که برابر تعداد متغیرها بوده از دیگر ویژگی‌های تابوی مورد استفاده می‌باشد که باعث کاهش بسیار زیاد زمان جستجو شده است. برای انجام محاسبات مربوط به الگوریتم تابو برنامه‌ای در نرم‌افزار MATLAB تهیه و سپس از طریق اتصال آن با برنامه

محاسبه است. هدف در نهایت تعیین ماتریس X می‌باشد. به‌طورکلی کریجینگ را بهترین تخمینگر خطی نارایب^۱ می‌دانند (۲). در این نوع کریجینگ مقدار میانگین مجهول است. شرط‌های نارایب بودن و صفر شدن خطای سیستماتیک، به‌گونه‌ای اعمال می‌شوند که میانگین بخشی از جواب مسئله باشد.

در هر روش تخمین همواره مقداری خطا وجود دارد. این خطا در واقع نشان‌دهنده اختلاف بین مقدار واقعی کمیت و مقدار تخمین زده شده توسط روش تخمین می‌باشد. یکی از ویژگی‌های کریجینگ قابلیت تعیین خطای تخمین در قالب واریانس خطای تخمین می‌باشد. واریانس تخمین نشان‌دهنده میزان پراکندگی داده‌ها در اطراف میانگین است. واریانس تخمین (σ_E^2) فضایی به بزرگی V از روی بخش‌ها یا تقسیم‌هایی به بزرگی v به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sigma_E^2 = 2\bar{\gamma}(v, V) - \bar{\gamma}(V, V) - \bar{\gamma}(v, v) \quad (3)$$

که در آن، $\bar{\gamma}$ نماد میانگین واریوگرام می‌باشد. منظور از v در حالت بلوکی تقسیم‌های درون بلوک و در حالت نقطه‌ای، نمونه‌های ایستگاهی موجود است.

در تمام روش‌های میانگین‌گیری مکانی به‌جز کریجینگ، ساختار فضایی در نظر گرفته نمی‌شود. به‌عنوان مثال در روش میانگین‌گیری حسابی موقعیت نقاط و نحوه پراکندگی آن‌ها در اطراف نقطه مورد تخمین لحاظ نمی‌گردد. در این پژوهش از نرم‌افزار GSLIB برای محاسبات مربوط به کریجینگ استفاده شد.

واریوگرام منطقه و استخراج پارامترها: ابتدا با استفاده از داده‌های برداشت‌شده سطح آب زیرزمینی در چاه‌ها و ضمن داشتن مختصات آن‌ها، واریوگرام تجربی محاسبه و سپس اقدام به برازش و تولید یک

-
- 2- Coefficient of determination
 - 3- Residual Sum of Squares
 - 4- combinatorial
 - 5- Short-term memory
 - 6- Tabu list
 - 7- Long-term memory
 - 8- Aspiration

-
- 1- Best linear unbiased estimator

تخمین نقطه‌ای و تخمین منطقه‌ای دو نوع تخمین صورت گرفته توسط کریجینگ هستند که در تخمین نقطه‌ای مقدار متغیر در نقطه مجهول با استفاده از اطلاعات حوضه مورد مطالعه اندازه‌گیری می‌شود ولی در تخمین منطقه‌ای، مقدار متوسط آن کمیت اندازه گرفته خواهد شد و در هر دو حالت واریانس خطای تخمین قابل محاسبه خواهد بود. البته طبیعتاً در تخمین منطقه‌ای فرمول‌های به کار گرفته شده اگرچه از نظر ساختاری با حالت نقطه‌ای یکسان هستند ولی تفاوت‌های جزئی در بطن خود به همراه دارند.

بر اساس مطالب مذکور می‌توان گفت تابع هدف، همان واریانس خطای تخمین خواهد بود که باید به حداقل مقدار خود برسد و این نشان‌دهنده بالاترین دقت تخمین است. بنابراین می‌توان تابع هدف را به‌طور کلی به صورت زیر بیان نمود:

$$\text{Min} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\sigma_E^2)_i \quad (4)$$

$$(x_i, y_i) \in \Gamma$$

که در آن‌ها، σ_E^2 واریانس خطای تخمین در هر بلوک (کریجینگ بلوکی) یا نقطه (کریجینگ نقطه‌ای) واقع در حوضه، i شماره اندیس هر بلوک یا نقطه درون حوضه، m تعداد کل بلوک‌ها یا نقطه‌های محاط در حوضه، (x_i, y_i) مختصات نقطه یا مرکز بلوک i و Γ مرز حوضه یا دشت مورد مطالعه می‌باشد.

در یک شبکه، ترکیبات مختلف چاه‌ها منجر به تولید تخمین‌های متفاوتی می‌گردد که در پروژه حاضر، جستجوی بهترین حالت مدنظر است. در این راستا به یک الگوریتم بهینه‌سازی نیاز خواهد بود. چرا که اگر مجموعه‌ای N عضو داشته باشد، تعدادی زیرمجموعه‌های n -تایی آن (تعداد ترکیب n از N) از رابطه زیر حاصل خواهد شد:

کریجینگ (نرم‌افزار GSLIB) فرایند بهینه‌سازی شکل گرفت (شکل ۳).

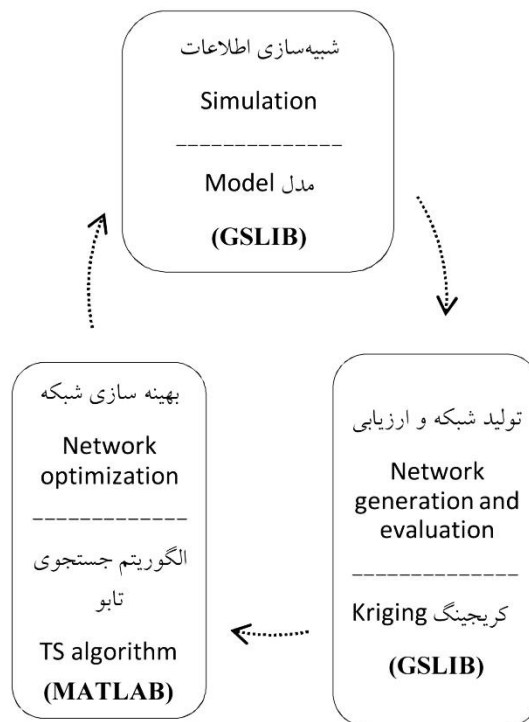
روش بهینه‌سازی چاه‌های مشاهده‌ای: منظور از بهینه‌سازی چاه‌های مشاهده‌ای، یافتن ترکیبی مناسب برای کم کردن خطای تخمین تراز سطح آب زیرزمینی در برآورد منطقه‌ای می‌باشد. به عبارت دیگر، اگر در شبکه‌ای N چاه موجود باشد و بنا به ضرورت‌هایی از جمله ضرورت اقتصادی، شبکه تنها مجاز به استفاده از n چاه باشد ($n < N$)، کدام ترکیب n تایی از بین چاه‌های موجود باید انتخاب شود که در یک حوضه بهترین عملکرد (تخمین) و یا همان می‌نیم خطای تخمین را در پی داشته باشد. همان‌طور که ذکر شد یکی از امتیازات روش کریجینگ، محاسبه واریانس خطای تخمین است. در واقع خطای تخمین، عبارت است از تفاوت مقادیر تخمین صورت گرفته با مقادیر واقعی متناظر. از آن‌جا که تعیین دقیق مقدار واقعی که همان مطلوب نهایی است، عملاً امکان‌پذیر نمی‌باشد، بنابراین خطای تخمین هم نمی‌تواند مشخص باشد. اما کریجینگ با بهره‌گیری از علم آمار و همین‌طور تعاریف واریانس، کوواریانس، فرضیات مانایی^۱، مشتق‌گیری‌های جزئی تابع واریانس خطا نسبت به اوزان چاه‌ها و مساوی صفر قرار دادن آن‌ها برای حداقل‌سازی واریانس خطا و حل سیستم‌های معادلاتی غیرمتوازن به دست آمده یا همان بهینه‌سازی مقید^۲ با استفاده از روش پارامتر لاگرانژ، ضمن به دست آوردن ضرایب وزنی چاه‌ها، قادر است واریانس خطای تخمین را نیز برآورد نماید. در این راه عملاً مقدار اصلی کمیت از صورت معادلات حذف شده و واریانس خطای تخمین^۳، معیاری برای اندازه‌گیری کیفیت تخمین به‌ازای هر متغیر مورد نظر در سطح منطقه خواهد بود.

- 1- Stationary
- 2- Constrained optimization
- 3- Variance of estimation error

زمانی ناممکن (۱،۶۷۱،۵۸۶ سال) طول خواهد کشید. از این‌رو برای یافتن ترکیب بهینه n -تایی از شبکه موجود باید از یک الگوریتم بهینه‌سازی استفاده کرد تا در انتخاب گزینه n تایی بهینه و رفع این مشکل و رسیدن به جواب در محدوده زمانی منطقی کمک نماید. در این پژوهش برای این منظور از الگوریتم جستجوی تابو همان‌طور که ذکر آن رفت، استفاده شده است. نحوه ارتباط کلی و روند بهینه‌سازی در شکل ۳ آورده شده است.

$$\binom{N}{n} = \frac{N!}{n!(N-n)!} \quad (5)$$

که در آن، (!) عملگر فاکتوریل می‌باشد. وقتی که N کوچک باشد بررسی تمام حالات امکان‌پذیر خواهد بود ولی وقتی N بزرگ باشد عملاً آنالیز و مقایسه همه ترکیبات آن امکان‌پذیر نیست. برای مثال، اگر N برابر ۱۰۰ و n برابر ۱۰ باشد، تعداد ترکیبات در حدود 1.7331×10^{13} خواهد بود که اگر زمان محاسبه برنامه کریجینگ برای هر زیرمجموعه را فقط یک-پنجم ثانیه فرض کنیم بررسی تک‌تک زیرمجموعه‌ها عملاً



شکل ۳- فرایند کلی و روش انجام بهینه‌یابی چاه‌های مشاهده‌ای.

Figure 3. General optimization process of observation wells.

اندازه‌گیری تراز آب زیرزمینی برای پنج حالت انجام شد. حالت‌های اول تا سوم برای صحت‌سنجی مدل حاصل از ترکیب برنامه GSLIB و الگوریتم تابوی MATLAB بوده و حالت چهارم و پنجم، شامل اجرای مدل با قبول درصدی از افزایش خطا (معادل

مراحل انجام کار و استخراج نتایج: ابتدا با استفاده از داده‌های برداشت‌شده سطح آب زیرزمینی یک واریوگرام تئوری برازش داده شد که مبنای محاسبات کریجینگ در مراحل بعدی قرار گرفت. پس از ورود اطلاعات و آماده‌سازی برنامه‌ها، نتایج حاصل از بهینه‌سازی شبکه

۷۵، ۷۴ و ۷۳ چاه از شبکه) به ترتیب ۷۶ و ۲۸۵۰ و ۷۰۳۰۰ ترکیب ممکنه (همه حالات) به صورت جستجوی کامل مورد ارزیابی قرار گرفتند و موقعیت بهینه چاه‌های مشاهده‌ای در هر حالت برای همان تعداد چاه مشخص شد.

پس از صحت‌سنجی مدل، طی دو مرحله تعدادی از چاه‌ها به گونه‌ای حذف شد که خطای زیادی نسبت به حالت اولیه ایجاد نشود، یا به عبارتی با حذف چاه‌ها واریانس خطای تخمین خیلی افزایش نداشته باشد (حدود ۱۰ درصد). بنابراین در مرحله اول ۱۶ چاه و در مرحله دوم ۲۶ چاه، که به ترتیب معادل انتخاب بهینه ۶۰ و ۵۰ چاه باقی‌مانده در محدوده آبخوان می‌باشد. نتایج حاصل از همه مراحل مذکور در ادامه آورده شده است.

نتایج و بحث

بر اساس معیارهای مذکور از بین واریوگرام‌های تئوری خطی، نمایی، کروی و گوسی، مدل گوسی بهترین مدل برازش داده شده بر تراز سطح ایستابی تشخیص داده شد. نتایج حاصل و پارامترهای این نوع واریوگرام در جدول ۱ آورده شده است.

با حذف تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای از شبکه اندازه‌گیری برای کاهش هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری است.

به منظور صحت‌سنجی مدل از ترکیباتی که واریانس خطا دارای مقدار بیشینه است، استفاده شد. واریانس خطای بیشینه زمانی رخ می‌دهد که بیش‌ترین تعداد ممکن از چاه‌های شبکه اندازه‌گیری حذف شود. وقتی از بین ۷۶ چاه موجود در دشت دزفول تنها تعداد اندکی از چاه‌ها باقی بماند و مابقی چاه‌ها حذف شود (مثلاً یک، دو و یا در نهایت سه چاه باقی بماند)، تعداد ترکیبات ممکنه مطابق رابطه ۵ محدود خواهد بود و بنابراین می‌توان به صورت مستقیم و بدون استفاده از بهینه‌یابی ریاضی، خطای تخمین همه ترکیبات را مورد ارزیابی قرار داد (روش جستجوی کامل) و در نهایت بهترین ترکیب (که دارای مینیمم واریانس خطا است) را مشخص نمود. نتیجه این کار مبنای صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدل بهینه‌ساز مورد استفاده در این پژوهش قرار گرفت. برای این منظور مدل بهینه‌ساز برای ترکیبات یک، دو و سه چاه مشاهده‌ای نیز اجرا شد تا نتایج آن با نتایج جستجوی کامل مقایسه شود. بدین منظور برای حالت یک، دو و سه چاه مشاهده‌ای باقی‌مانده (به ترتیب معادل با حذف

جدول ۱- پارامترهای واریوگرام گوسی برازش داده شده بر سطح آب زیرزمینی.

Table 1. Gaussian variogram parameters fitted to groundwater level.

نام پارامتر Parameter	$\frac{C}{(C_0 + C)}$	شعاع تأثیر Parameter Range (A ₀)	حد آستانه Sill (C ₀ +C)	اثر قطعه‌ای Nugget (C ₀)
مقدار پارامتر Value	0.993	48480	0.2172	0.0036

بهینه حاصل با روش جستجوی کامل و جستجوی تابو کاملاً یکسان و مطابق شکل‌های مذکور می‌باشد. این نتایج، صحت نتایج حاصل از مدل بهینه‌سازی را

نتایج حاصل برای جستجوی انتخاب بهینه یک، دو و سه چاه مشاهده‌ای از ۷۶ چاه موجود در دشت دزفول در شکل‌های ۴ تا ۶ آورده شده است. موقعیت

به مراتب کم‌تر از حالت جستجوی کامل می‌باشد. این موضوع در جدول ۲ نشان داده شده است. در این جدول مدت زمان اجرای CPU یک کامپیوتر با مشخصات Processor: Core 2 RAM: 2.00GB Duo CPU T3900@2.5GHz برای جستجوی کامل و مدل بهینه‌ساز به تفکیک ارائه شده است.

تأیید می‌کند. علاوه بر این در شکل‌های مذکور فرایند جستجوی الگوریتم تابو و تعداد تکرارهای لازم جهت دستیابی به مقدار بهینه که همان حداقل واریانس خطای کریجینگ می‌باشد، ارائه شده است. اما نکته قابل‌توجه آن است که حتی برای تعداد کم چاه‌ها مدل بهینه‌ساز برتری خود را نشان می‌دهد، چرا که زمان دستیابی به نقطه بهینه با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز

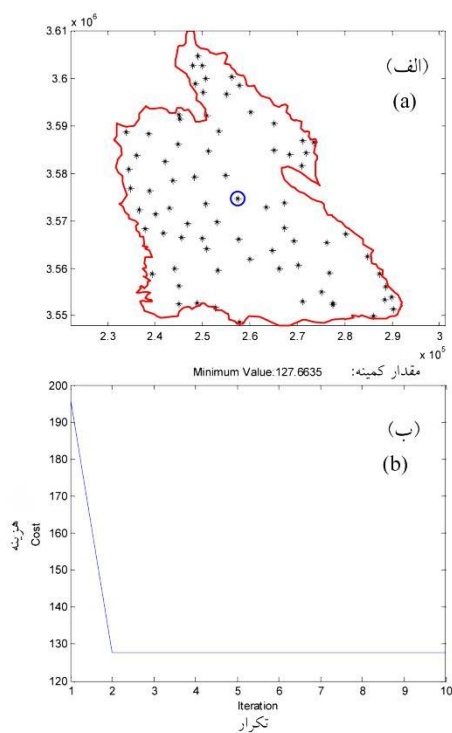
جدول ۲- زمان اجرای برنامه بر اساس جستجوی کامل و مدل بهینه‌ساز.

Table 2. CPU time for complete search and the optimization model.

زمان اجرای برنامه (ثانیه)		تعداد چاه باقی‌مانده در دشت Number of remained wells
مدل بهینه‌ساز Model	جستجوی کامل Complete search	
118.3	14.1	1
269.1	745.4	2
695	18690	3
8594.1	-	50
6737.7	-	60

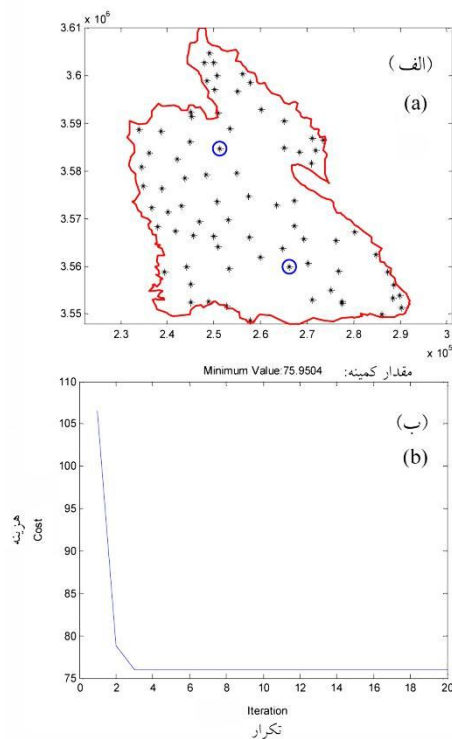
فرایند همگرایی الگوریتم تابو برای یک، دو و سه چاه مشاهده‌ای در شکل‌های ۴-ب، ۵-ب و ۶-ب نیز آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد برای یک چاه مشاهده‌ای الگوریتم تنها در یک تکرار، و برای دو چاه مشاهده‌ای در ۳ تکرار و برای سه چاه مشاهده‌ای در ۵ تکرار به جواب بهینه رسیده است. این موضوع نشان می‌دهد با اضافه شدن تعداد چاه‌ها بر پیچیدگی مسأله افزوده می‌شود. علاوه بر این می‌توان گفت که الگوریتم تابوی مورد استفاده در این پژوهش برای جستجوی ترکیب بهینه چاه‌ها در منطقه از سرعت و دقت نسبتاً مناسبی برخوردار است.

نتایج حاصل از پیدا کردن تک چاه بهینه در دشت دزفول نشان می‌دهد که موقعیت چاه بهینه، نزدیک به مرکزیت دشت قرار دارد (شکل ۴-الف) و همین‌طور نتایج برای حالت ۲ و ۳ چاه مشاهده‌ای (شکل‌های ۵-الف و ۶-الف)، توزیع یکنواختی از چاه‌ها را در منطقه ارائه می‌دهد که بیانگر این است واریوگرام منطبق بر سطح آب زیرزمینی منطقه، ناهمسان‌گرد نیست. چرا که در صورتی که واریوگرام ناهمسان‌گرد باشد یکنواختی توزیع چاه‌ها برهم خواهد خورد. قابلیت اعمال ناهمسان‌گردی از ویژگی‌ها و برتری‌های روش کریجینگ نسبت به سایر روش‌های میانجی‌ها همانند تیسن و عکس فاصله می‌باشد.



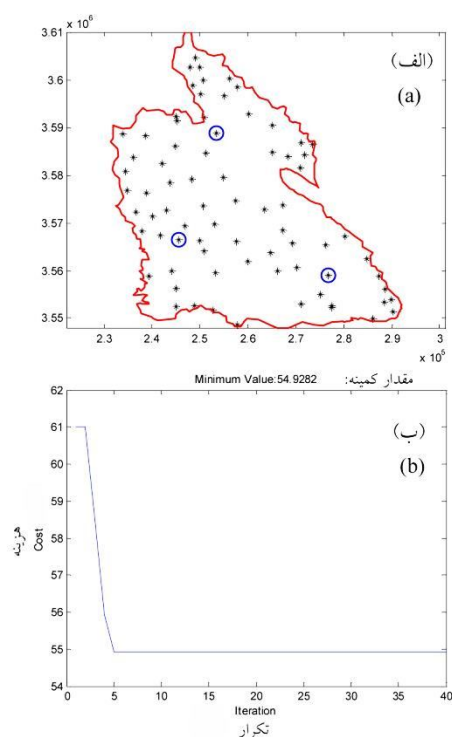
شکل ۴- (الف) موقعیت بهینه تک چاه مشاهده‌ای (ب) نحوه همگرایی الگوریتم تابو.

Figure 4. (a) Optimal position of one observation well, (b) Optimization process of TS algorithm.



شکل ۵- (الف) موقعیت بهینه دو چاه مشاهده‌ای (ب) نحوه همگرایی الگوریتم تابو.

Figure 5. (a) Optimal position of two observation wells, (b) Optimization process of TS algorithm.



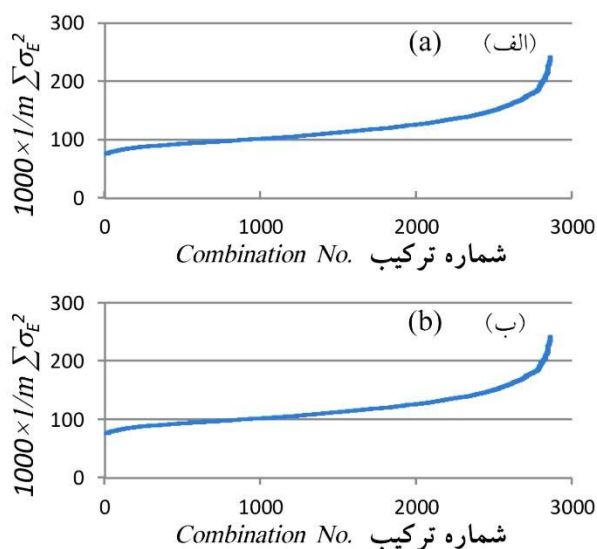
شکل ۶- (الف) موقعیت بهینه سه چاه مشاهده‌ای (ب) نحوه همگرایی الگوریتم تابو.

Figure 6. (a) Optimal position of three observation wells, (b) Optimization process of TS algorithm.

باقی‌مانده دشت ۵۰ و ۶۰ حلقه بوده را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودار فرایند بهینه‌یابی مشاهده می‌شود برای حالت ۶۰ چاه مدل سریع‌تر توانسته است موقعیت بهینه چاه‌ها را پیدا نماید. این موضوع را می‌توان از جدول ۲ شامل زمان اجرای برنامه نیز استنباط نمود. دلیل این امر آن است که برای ۵۰ چاه تعداد کل ترکیبات ممکنه، بیشتر از آن تعداد برای ۶۰ چاه می‌باشد و بنابراین پیدا نمودن ترکیب بهینه برای ۵۰ چاه مشکل‌تر خواهد بود. بدین معنی که بر اساس رابطه ۵ تعداد ۵۰ چاه برابر $\binom{76}{50} = 1.5372 \times 10^{20}$ بوده که بیشتر از تعداد ترکیبات ۶۰ چاه $\binom{76}{60} = 1.0830 \times 10^{16}$ می‌باشد.

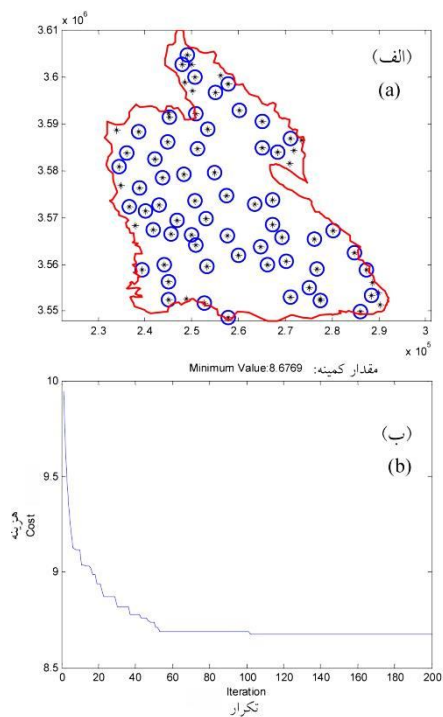
در پژوهشی که توسط لی و الیسینز انجام شد، نتایج آن‌ها نشان داد که الگوریتم تابو به‌عنوان الگوریتم برتر نسبت به سایر الگوریتم‌هایی مانند SA، GA و سایر الگوریتم‌های مورد استفاده می‌باشد (۲۴). منطقی به‌نظر می‌رسد هرچه تعداد چاه‌ها بیشتر می‌شود، واریانس خطای تخمین کم‌تر شود. اما این نکته قابل ذکر است که بر اساس گراف‌های شکل ۷ برای حالتی که تعداد چاه‌ها بیشتر (۳ چاه) است، هنوز ترکیباتی وجود دارد که خطای آن‌ها بسیار بیشتر از خطای ترکیباتی با تعداد چاه کم‌تر (۲ چاه) است. بنابراین در اینجا انتخاب موقعیت بهینه بخوبی قابل لمس می‌باشد.

شکل‌های ۸- الف و ۹- الف موقعیت بهینه چاه‌ها و فرایند بهینه‌یابی را برای وقتی که تعداد چاه‌های



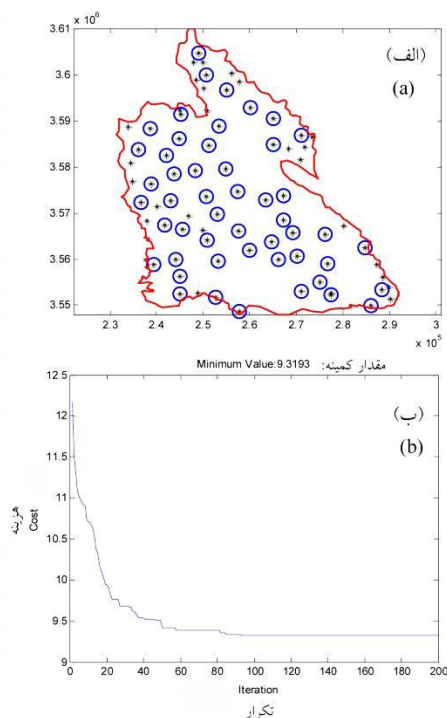
شکل ۷- میانگین واریانس خطای تخمین در مقابل همه ترکیبات ممکن که به صورت صعودی مرتب شده‌اند: (الف) برای ۲ چاه مشاهده‌ای، (ب) برای ۳ چاه مشاهده‌ای.

Figure 7. Mean variance estimation error vs. the all possible combinations which ordered ascending: (a) for two observation wells, (b) for three observation wells.



شکل ۸- (الف) موقعیت بهینه ۶۰ چاه مشاهده‌ای (ب) نحوه همگرایی الگوریتم تابو.

Figure 8. (a) Optimal position of 60 observation wells, (b) Optimization process of TS algorithm.

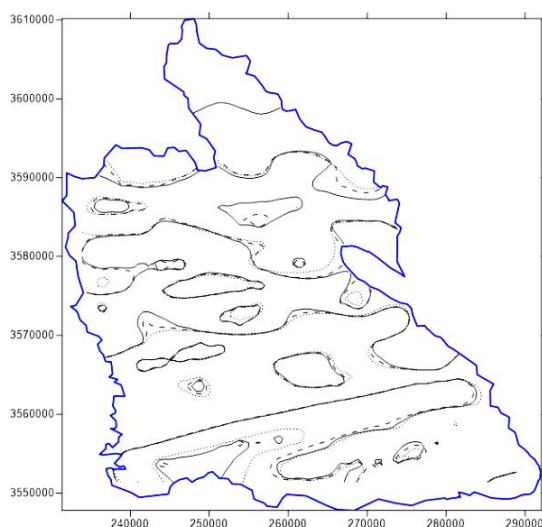


شکل ۹- (الف) موقعیت بهینه ۵۰ چاه مشاهده‌ای (ب) نحوه همگرایی الگوریتم تابو.

Figure 9. (a) Optimal position of 50 observation wells, (b) Optimization process of TS algorithm.

به حذف ۳۰ درصد کل چاه‌ها بوده است کاملاً هم‌خوانی دارد و نشان می‌دهد این تعداد حذف چاه منطقی به نظر می‌رسد. در واقع واریانس خطا برای حالت‌های ۵۰ و ۶۰ چاه مشاهده‌ای نسبت به ۷۶ چاه، به ترتیب ۴ و ۱۲ درصد افزایش پیدا کرده است. مقدار واریانس خطای تخمین برای ۷۶، ۶۰ و ۵۰ چاه مشاهده‌ای بر اساس محاسبات کریجینگ به ترتیب ۰/۰۰۸۳۴، ۰/۰۰۸۶۸ و ۰/۰۰۹۳۲ به دست آمده است (شکل‌های ۸ و ۹).

برای مقایسه خطوط تراز سطح آب زیرزمینی، خطوط تراز حاصل بر اساس ۷۶ (هیچ چاهی حذف نشده)، ۶۰ (معادل با حذف ۱۶ چاه) و ۵۰ (معادل با حذف ۲۶ چاه) چاه مشاهده‌ای در شکل ۱۰ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مطابق انتظار بیش‌ترین اختلاف مربوط به خطوط تراز ۵۰ چاه مشاهده‌ای است که حدوداً معادل حذف ۳۵ درصد چاه‌های مشاهده‌ای است. این نتایج با نتایج خرم‌دل و همکاران (۲۰۱۵) که بیش‌ترین اختلاف آن‌ها مربوط



شکل ۱۰- خطوط هم تراز آب زیرزمینی دشت دزفول بر اساس ۷۶ چاه مشاهده‌ای (خط پر)، ۶۰ چاه مشاهده‌ای (خط چین) و ۵۰ چاه مشاهده‌ای (نقطه چین).

Figure 10. Groundwater level contours in Dezful plain for 76 (solid line), 60 (dashed line) and 50 (dotted line) observation wells.

چاه مشاهده‌ای از بین ۷۶ چاه موجود در منطقه می‌باشد. یافتن موقعیت بهینه برای سه حالت اول با استفاده از مدل بهینه‌ساز و روش جستجوی کامل مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج آن‌ها کاملاً مشابه و تأییدی بر صحت کارکرد مدل تهیه شده بود. در دو حالت دیگر تعداد ۱۶ و ۲۶ چاه مشاهده‌ای حذف شد که به ترتیب معادل یافتن انتخاب بهینه ۶۰ و ۵۰ چاه مشاهده‌ای از بین ۷۶ چاه موجود می‌باشد. برای دو حالت اخیر بهترین ترکیب با استفاده از مدل بهینه‌ساز ارائه شد. واریانس خطای تخمین کمینه شده برای حذف ۱۶ و ۲۶ چاه مشاهده‌ای از منطقه در حالت بهینه به ترتیب حدوداً ۴ و ۱۲ درصد نسبت به حالت عدم حذف چاه (یعنی ۷۶ چاه) افزایش داشته است که با حذف بیش تر چاه‌ها می‌تواند بیش تر هم بشود.

نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مدل بهینه‌ساز موجب صرفه‌جویی زمان بسیار زیادی در استخراج نتایج شده است، به گونه‌ای که برای حالت‌هایی که تعداد چاه‌ها بسیار زیاد می‌باشد، استفاده از مدل

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور کاهش تعداد چاه‌های مشاهده‌ای دشت دزفول- اندیمشک، ۷۶ چاه مشاهده‌ای در منطقه مورد مطالعه قرار گرفت. با استفاده از داده‌های برداشت شده سطح آب زیرزمینی، واریوگرام تجربی منطقه به دست آمد و سپس یک واریوگرام تئوری بر آن برازش داده شد که مدل گوسی بهترین مدل تئوری انتخابی بود. بر اساس واریوگرام مستخرج و با استفاده از روش کریجینگ تصمیم گرفته شد اگر بنا باشد تعدادی از چاه‌ها حذف گردد، کدام چاه‌ها حذف و کدام چاه‌ها باقی بماند تا انتخاب بهینه صورت گیرد. بر همین اساس واریانس خطای تخمین که یکی از خروجی‌های کریجینگ می‌باشد، به عنوان تابع هدف مورد استفاده قرار گرفت. فرایند کاهش تعداد چاه‌های مشاهده‌ای در پنج حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفت. سه حالت اول شامل حذف تعداد ۷۵، ۷۴ و ۷۳ چاه مشاهده‌ای که به ترتیب معادل یافتن انتخاب بهینه یک، دو و سه

مشاهده‌ای می‌باشد. بیشترین اختلاف مربوط به حذف ۲۶ چاه مشاهده‌ای (معادل ۳۵ درصد چاه‌ها) بوده که با نتایج خرم‌دل و همکاران (۲۰۱۵) کاملاً هم‌خوانی دارد.

بهینه‌ساز اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. همچنین مقایسه تراز سطح آب زیرزمینی برای ۵۰، ۶۰ و ۷۶ چاه مشاهده‌ای نشان می‌دهد که خطوط تراز برای این سه حالت بسیار به هم نزدیک بوده و بیانگر دقت بسیار مناسب مدل بهینه‌ساز در پیدا کردن محل چاه‌های

منابع

1. <http://water.usgs.gov/edu/watercycle.html>. The Water Cycle - USGS Water Science School. United States Geological Survey (USGS).
2. Hassani Pak, A.A. 2008. *Geostatistics*. Tehran University, Tehran, Iran, 314p.
3. Liu, S., Mo, X., Li, H., Peng, G., and Robock, A. 2001. Spatial Variation of Soil Moisture in China: Geostatistical Characterization. *J. Meteorol. Soc. Japan*. 79: 1B. 555-574.
4. Sharma, M.L., Gander, G.A., and Hunt, C.G. 1980. Spatial variability of infiltration in a watershed. *J. Hydrol.* 45: 1-2. 101-122.
5. Sun, W., and McBratney, A. 2012. Analysis and prediction of soil properties using local regression-kriging. *Geoderma*. 171: 1. 16-23.
6. Cheng, K.-S., Wei, C., Cheng, Y.-B., and Yeh, H.-C. 2003. Effect of spatial variation characteristics on contouring of design storm depth. *Hydrological Processes*. 17: 9. 1755-1769.
7. Pardo-Igúzquiza, E. 1998. Optimal selection of number and location of rainfall gauges for areal rainfall estimation using geostatistics and simulated annealing. *J. Hydrol.* 210: 1-4. 206-220.
8. Kebaili Bargaoui, Z., and Chebbi, A. 2009. Comparison of two kriging interpolation methods applied to spatiotemporal rainfall. *J. Hydrol.* 365: 1-2. 56-73.
9. Asakereh, H. 2008. Kriging Application in Climatic Element Interpolation, A Case Study: Iran Precipitation. *Geograph. Dev. Iran. J.* 6: 12. 25-42. (In Persian)
10. Tsintikidis, D., Georgakakos, K.P., Sperflage, J.A., Smith, D.E., and Carpenter, T.M. 2002. Precipitation Uncertainty and Raingauge Network Design within Folsom Lake Watershed. *J. Hydrol. Engin.* 7: 2. 175-184.
11. Barca, E., and Passarella, G. 2008. Spatial evaluation of the risk of groundwater quality degradation. A comparison between disjunctive kriging and geostatistical simulation. *Environmental Monitoring and Assessment*. 137: 1-3. 261-273.
12. Barca, E., Bruno, D.E., and Passarella, G. 2016. Optimal redesign of environmental monitoring networks by using software MSANOS. *Environmental Earth Sciences*. 75: 14. 1082.
13. Ghahraman, B., Hosseini, S.M., and Asgari, H.R. 2003. Use of Geostatistics in Evaluation of Groundwater Quality Monitoring Network. *Amirkabir J. Sci. Res.* 30: 1. 971-981. (In Persian)
14. Karamouz, M., Kerachian, R., Akhbari, M., and Hafez, B. 2009. Design of River Water Quality Monitoring Networks: A Case Study. *Environmental Modeling and Assessment*. 14: 6. 705-714.
15. Ben-Jemaa, F., and Mariño, M.A. 1990. Optimization of a Groundwater Well Monitoring Network. *Optimizing the Resources for Water Management, Proceeding Paper, American Society of civil Engineers (ASCE)*, Pp: 610-614.
16. Prakash, M.R., and Singh, V.S. 2000. Network design for groundwater monitoring - a case study. *Environmental Geology*. 39: 6. 628-632.
17. Kumar, V., and Remadevi. 2006. Kriging of Groundwater Levels – A Case Study. *J. Spatial Hydrol.* 6: 1. 12.
18. Nikroo, L., Kompani-Zare, M., Sepaskhah, A.R., and Fallah Shamsi, S.R. 2010. Groundwater depth and elevation interpolation by kriging methods in Mohr Basin of Fars province in Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*. 166: 1-4. 387-407.

19. Noori, S.M., Ebrahimi, K., Liaghat, A.M., and Hoorfar, A.H. 2013. Comparison of different geostatistical methods to estimate groundwater level at different climatic periods. *Water Environ. J.* 27: 1. 10-19.
20. Zamani, R., Akhondali, A.M., Zarei, H., and Radmanesh, F. 2014. Estimation of the groundwater level by using a combined optimized method with Genetic Algorithms in Ramhormoz plain. *Irrig. Water J.* 4: 15. 26-38. (In Persian)
21. Mirzaei, N., Maroofpour, S., and Dinpashoh, Y. 2016. Estimation of the Groundwater Level using the Geostatistics; Case Study Tabriz plain. 5th Comprehensive Water Resources Management Conference, Pp: 1-9. (In Persian)
22. Zamani, R., Akhond-Ali, A.M., and Zarei, H. 2017. An application of combined geostatistics with optimized artificial neural network by genetic algorithm in estimation of groundwater Level (Case study: Dezful and Zeidoon plains). *Irrigation Sciences and Engineering.* 40: 2. 27-37. (In Persian)
23. Kord, K. 2017. Modeling of groundwater level fluctuations in Interaction with Dez river. M.Sc. Thesis, Khoramshahr Marine Science and Technology University, Khoramshahr, Iran, 86p. (In Persian)
24. Lee, Y.-M., and Ellis, J.H. 1996. Comparison of Algorithms for Nonlinear Integer Optimization: Application to Monitoring Network Design. *J. Environ. Engin.* 122: 6. 524-531.
25. Nunes, L.M., Cunha, M.C., and Ribeiro, L. 2004. Groundwater Monitoring Network Optimization with Redundancy Reduction. *J. Water Resour. Plan. Manage.* 130: 1. 33-43.
26. Safari, M. 2002. Determination of Optimal Groundwater Piezometric Network Using Geostatistics Methods. M.Sc. Thesis, Tarbiyat Modares University, Tehran, Iran, 135p. (In Persian)
27. Dehghani, A.A., Asgari, M., and Mosaedi, A. 2009. Comparison of Geostatistics, Artificial Neural Networks and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Approaches in Groundwater Level Interpolation, Case study: Ghazvin Aquifer. *J. Agric. Sci. Natur. Resour.* 16: 1-b. 517-529.
28. Nikroo, L., Kompani-Zare, M., and Sepaskhah, A.R. 2009. Optimization of groundwater level measuring network using geostatistics, A case study: Mohr basin in Fars Province. 3th Iranian Water Resources Management Conference, Tabriz, Iran, Pp: 1-9. (In Persian)
29. Ganji Khoramdel, N., Keykhaei, F., Mohammadi, K., and Monem, M.J. 2015. Optimization of Groundwater Elevation Monitoring Network Using Particle Swarm Optimization Technique. *J. Hydr.* 3: 1. 25-35. (In Persian)
30. Mirzaie-Nodoushan, F., Bozorg-Haddad, O., and Loaíciga, H.A. 2017. Optimal design of groundwater-level monitoring networks. *J. Hydroinf.* 19: 6. 920-929.
31. Glover, F. 1990. Tabu search: A tutorial. *Interfaces.* 20: 4. 74-94.



Minimization of groundwater observation wells using geostatistics and optimization technique (Case study: Dezfoul-Andimeshk plain)

*A. Raeisi Isaabadi¹, H.R. Ghafouri² and M. Moslemzadeh³

¹Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Shahrekord University,

²Professor, Dept. of Civil Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz,

³Expert in Water Resources, Khuzestan Water and Power Authority

Received: 04.04.2018; Accepted: 06.19.2018

Abstract

Background and Objectives: Groundwater is one of the most valuable water resources owing to its quantity and quality. Measuring water level is a basic and essential step in any groundwater study. Since the measured data are derived only from a limited number of observation points and, at the same time, they must be extended to the whole surface of the zone, it is essential to determine optimal location of measuring network. Accordingly, for reduction of observation wells, a number of them were eliminated in such a way that the remaining wells have an optimal combination.

Materials and Methods: Dezfoul-Andimeshk plain, located in north of Khuzestan province, was investigated as a case study. Kriging, as the best linear unbiased estimator, was used for interpolation of groundwater level. Based on the measured data of 76 studied observation wells, a theoretical variogram was fitted to empirical variogram points. To achieve the optimal combination, tabu search algorithm (a meta-heuristic algorithm) was used. Two computer programs including GSLIB and MATLAB were used for Kriging and tabu search, respectively. By connecting these two programs and providing conditions for the exchange of information between them, a model called optimizer model was developed to provide the ability to optimize the groundwater level measurement network. The observation points are distributed in such a way that minimize the variance estimation error limited to the plain extent.

Results: Optimization model was implemented for five completely different modes. For the first to third cases, which aimed only at verifying the model, the optimal selection of one, two, and three observation wells was presented, which, by comparing the complete search method, verified the functionality of the model was confirmed. In the fourth and fifth cases, the optimal selection of 50 and 60 out of 76 observation wells were presented for which the groundwater levels were compared and the results showed that there exists a good match between the groundwater surface results in comparison with those of whole wells (76 wells).

Conclusion: Due to the fact that the variogram of the region is an isotropic variogram, the distribution of wells is uniform in different directions. This is tangible for the first to third cases in which the number of wells is small. The results of optimization of 50 and 60 observation wells without any interference during the optimization process were automatically achieved by the model. The comparison of the groundwater level confirms the accuracy of the model results. Also, the results showed a great deal of time saving through the use of the present model.

Keywords: Geostatistics, Groundwater, Monitoring network, Optimization, Tabu search

* Corresponding Author; Email: ali_raeisi@agr.sku.ac.ir