Archive of SID

مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۹، شماره ۳، ۱۳۹۴، صفحه ۱۷-۲۹

طراحی و توسعه شبکه پایش سطح آب زیرزمینی با استفاده از زمین‌آمار و روش‌های آماری در دشت اراک

ناصر گنجی خرم‌دل[۱]، فاطمه کیخایی[۲]، مهدی مردیان[۳*]

[۱] گروه مهندسی آب، دانشگاه اراک
[۲] مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی
[۳] دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، اراک، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۱/۲۴، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۱/۱۵)

چکیده

امروزه مدل‌های برآوردگر سطح آب زیرزمینی در امر توسعه و تأمین آب کشاورزی و مدیریت آن نقش مهمی ایفا می‌کنند. به علت اینکه میزان دقت مدل‌های برآوردگر در ارتباط با تعداد داده‌های اندازه‌گیری‌شده نیز هست، باید یک فرایند بهینه‌سازی به‌منظور دستیابی به تعداد داده‌های مناسب همانند تعداد شبکه چاه‌های مشاهده‌ای داشت. هدف از این تحقیق، عرضه روشی برای بررسی کفایت شبکه چاه‌های مشاهده‌ای سطح آب زیرزمینی دشت اراک براساس تحلیل‌گر زمین‌آماری کریجینگ و ارزیابی نتایج آن با روش‌های آماری است. بدین‌منظور ابتدا با روش زمین‌آمار کریجینگ معمولی، نیم‌پراش‌نمای تجربی برای ۴۵ داده سطح آب زیرزمینی در دشت اراک تهیه شد. سپس به‌منظور تشریح میزان پتانسیل بهبود کیفیت شبکه مشاهده‌ای و ارزیابی دقت و صحت برآوردها، سه تحلیل آماری شامل برآورد خطای میان‌یابی، ارزیابی متقابل و تغییرپذیری با زمان به کار گرفته شد. مطابق با نتایج، می‌توان ۵ چاه از میانه دشت اراک را از شبکه پایش حذف کرد؛ درحالی‌که در ۵ نقطه دیگر، عمدتاً در شرق و شمال شرق، نیاز به چاه است. همچنین با توجه به تحلیل وردش زمانی صورت گرفته، در ۱۰ چاه مشاهده‌ای، نیازی به اندازه‌گیری با مقیاس زمانی کوتاه نیست و اندازه‌گیری‌هایی در مقیاس فصلی نیز برای پایش سطح آب زیرزمینی کفایت می‌کند.

واژه‌های کلیدی: سطح آب زیرزمینی، شبکه پایش، روش کریجینگ، خطای برآورد، ارزیابی متقابل

Design and development of groundwater level monitoring network using geostatistical and statistical methods in Arak plain

Naser Ganji Khorramdel[1], Fatemeh Keykhaei[2], Mehdi Mardian[*3]

[1] *Dep. of Water Engineering, Arak University, Iran*
[2] *Agricultural and Natural Resource Research Center of Markazi Province, Iran*
[3] *Young Researchers and Elite Club, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran*

(Received: 14 January 2014, accepted: 21 January 2015)

Summary

Nowadays, groundwater level estimator models have important roles in development and management of water supplies for agriculture. The analysis of the data obtained from

[*]Corresponding author: mehdimardian@gmail.com [*]نگارنده رابط:

www.SID.ir

Archive of SID

quality and quantity monitoring of groundwater resources is related to the environmental factors and spatial continuous variation is an important common characteristic. For a quantitative description of the distribution patterns of the environmental variables, in addition to the determination of the amount of factor, geographical location of the observations data must be considered. Since the accuracy of the estimator models depends on the quantity of the measured input data, an optimization process is necessary to provide an adequate number of data points like the monitoring wells. Therefore, it is necessary to design and develop a monitoring network in the management programs of groundwater resources.

The results of various studies have shown that making use of a geostatistic technique, especially the Kriging method, the groundwater resources could be predicted and monitored with a good performance. Also, the distribution conditions of the observation data and its adequacy can be studied with this method. However, monitoring investigation in Iranian watersheds has been carried out extensively. The subject is very important because in those country plains that are fertile and have the potential to grow various crops depending on the climate, the groundwater level monitoring networks must be well managed.

Arak unchained aquifer with an area of 1946 square kilometers has 1458 deep wells and 1554 semi-deep wells. The purpose of this research was to prepare a methodology to investigate on the adequacy of groundwater level monitoring wells in the Arak Plain using the Kriging geostatistical method and the evaluate its advantages with respect to statistical methods. To analyse the data, 45 wells were selected from the Arak Plain. First, Kolmogorov-Smirnov test was carried out for data normality. Then, the best semivariogram of the Kriging method was determined based on R^2 and RSS. For accuracy evaluation of the monitoring network model, statistical analysis m,measures including the interpolation error, cross validation, and time variation.

According to results of R^2 and RSS, an experimental variogram in the kriging method was best model. Also, nugget/sill is 0.22 that indicated spatial correlation was high. Based on the interpolation error, in borders of the Arak plain, uncertainty was high due to the lack of observation data. It indicates that the monitoring network needs further development to make it denser in this regions. Based on cross validation, in wells 6, 29, 35 and 36, the difference between observation and estimation data is high, showing that uncertainty in those regions has increased. Therefore, observation data in those regions are important and more wells are necessary. Because Meyghan wetland is located in the center plain, management programs should be considered in monitoring network. It is possible to eliminate 5 observation wells from the middle of the Arak plain, while 5 other wells are needed in the east and northeast of the region. Also, time variation analysis showed that in 10 monitoring wells, short time scale measurement is not needed and it suffices to carry out seasonal scale estimates for groundwater level monitoring.

Keywords: groundwater level, monitoring network, Kriging method, estimation error, cross validation

۱ مقدمه

افزایش روزافزون جمعیت جهان و نیاز شدید به مواد غذایی از یک سو و محدودیت منابع آب و خاک قابل دسترسی از سوی دیگر، لزوم برنامه‌ریزی استفاده صحیح‌تر از منابع آب و خاک موجود را دوچندان می‌کند (نیک‌بخت و همکاران، ۱۳۸۶). آب زیرزمینی فراوان‌ترین منبع قابل دسترس آب شیرین در دنیا است و ۹۷ درصد منابع آب شیرین دنیا را (به‌جز یخ‌های قطبی و یخچال‌ها)

www.SID.ir

Archive of SID

تشکیل می‌دهد و گاهی ثروت پنهان نامیده می‌شود. بااین‌حال اقدامات لازم برای حفاظت و مدیریت آن با روش‌هایی از لحاظ محیط زیست پایدار، یا صورت نمی‌گیرد، یا بسیار دیر به انجام می‌رسد و اغلب به هنگام وقوع خشکسالی در برخی مناطق، اهمیت آن بیشتر مشخص می‌شود (شرکت مدیریت منابع آب، ۱۳۹۰). بنابراین لازم است برای استمرار یا توسعه بهره‌برداری از آب‌های زیرسطحی، برای انواع مصارف و اهداف گوناگون و همچنین ایجاد هرگونه سازه آبی، مجموعه ویژگی‌های کمی و کیفی آبخوان‌ها شناسایی شود. نیل به هدف پیش‌گفته فقط با اجرای عملیات رفتارسنجی (کمی و کیفی) آب‌های زیرزمینی امکان‌پذیر می‌شود.

موضوعات اساسی در بررسی تغییرات کمی منابع آبی مربوط به اندازه‌گیری پارامترهایی مانند سطح آب زیرزمینی، آبدهی منابع بهره‌برداری انتخابی و تخلیه منابع آب زیرزمینی است که با تحلیل تغییرات این عوامل نسبت به زمان و تلفیق نتایج به‌دست آمده، می‌توان به مدیریت پرداخت. در پایش کمی منابع آب زیرزمینی می‌توان به اطلاعاتی از قبیل خصوصیات زمین‌شناختی و آب‌شناختی آبخوان دست یافت (شرکت مدیریت منابع آب، ۱۳۸۴).

تحلیل اطلاعات به‌دست آمده از پایش کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی در ارتباط با عوامل محیطی تأثیرگذار است که یکی از خصوصیات مشترک این عوامل محیطی، تغییرات پیوسته مکانی آنها است. به‌منظور توصیف کمی الگوهای پراکنش چنین متغیرهای محیطی، علاوه بر مقدار تعیین شده خصوصیت موردنظر، باید موقعیت جغرافیایی مشاهدات نیز به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته شود (بوما و همکاران، ۱۹۹۶). همچنین یکی از پارامترهای موثر در توصیف متغیرهای محیطی، کفایت داده‌ها است. بالا رفتن درجه اطمینان از کفایت داده‌ها علاوه بر توسعه و تکمیل بانک داده، منجر به افزایش دقت مدل‌های برآوردی و کاهش خطای آنها خواهد شد. بنابراین لازم است به‌منظور طراحی و توسعه یک سامانه پایش در بخش مدیریت منابع آب زیرزمینی، علاوه بر مقدار و موقعیت داده‌های اولیه، تعداد داده‌ها و موضوع کفایت آنها مد نظر برنامه‌ریزان قرار گیرد.

یکی از مشخصه‌های مهم در پروژه‌های منابع آب زیرزمینی، سطح ایستابی است که باید تا حد امکان با دقت زیادی اندازه‌گیری شود و یا اینکه با استفاده از مدل‌های برآوردگر برای نقاط یا سطوح بدون نمونه‌برداری، برآوردی صورت بگیرد. در دهه‌های اخیر، استفاده از مدل‌های برآوردگر به‌منظور پایش سطح آب زیرزمینی توسعه چشمگیری یافته است. اما بررسی موضوعاتی نظیر کفایت داده‌ها و پایش متغیر پیش‌گفته از نقطه‌ای به نقطه دیگر، به گونه‌ای است که به شیوه‌های معمول تحلیل آماری به سادگی امکان‌پذیر نیست؛ زیرا در بسیاری از روش‌های متداول آمار کلاسیک، موقعیت مکانی نمونه‌های برداشت شده در نظر گرفته نمی‌شود (کایدانی و دلبری، ۱۳۹۱). یکی از روش‌های معمول در سال‌های اخیر به‌منظور طراحی و توسعه شبکه پایش سطح آب زیرزمینی، روش زمین‌آمار است. تفاوت اصلی این روش با آمار کلاسیک این است که در آمار کلاسیک، نمونه‌های گرفته شده از یک جامعه آماری، مستقل از یکدیگرند و وجود یک نمونه هیچ‌گونه اطلاعاتی درباره نمونه بعدی به‌دست نمی‌دهد. بااین‌حال روش‌های زمین‌آماری، وجود همبستگی مکانی بین مقادیر یک متغیر در یک ناحیه را بررسی می‌کنند. به‌طورکلی می‌توان گفت زمین‌آمار به بررسی آن دسته از متغیرهایی می‌پردازد که دارای ساختار مکانی هستند و یا به عبارتی بین مقادیر متفاوتشان، فاصله و جهت قرارگرفتن آنها یک ارتباط فضایی وجود دارد (حسنی پاک، ۱۳۷۷). از بین روش‌های زمین‌آمار، روش کریجینگ یکی از متداول‌ترین برآوردگرها محسوب می‌شود که متکی بر میانگین متحرک وزنی است. این روش بهترین برآوردگر نااریب

www.SID.ir

Archive of SID

است که علاوه بر مقادیر برآورد شده، میزان خطای برآورد در هر نقطه را نیز مشخص می‌کند. کریجینگ به‌منزلهٔ روش قدرتمند درون‌یابی معرفی شده و در رشته‌های گوناگون علوم زمین مانند آب‌شناسی (هیدرولوژی)، علوم خاک و معدن به‌کار رفته است (ژو و همکاران، ۲۰۰۶). تحقیقات گوناگونی در مورد ارزیابی شبکه پایش آب زیرزمینی از لحاظ پارامترهای کمی و کیفی و همچنین تحلیل‌های زمین‌آمار صورت گرفته است. نتایج تحقیقات گوناگون نشان می‌دهد که تحلیل‌گر زمین‌آمار کریجینگ نتایج قابل‌قبولی در برآوردهای مربوط به بررسی منابع آب و خاک به همراه داشته است (اولئا و دیویس، a۱۹۹۹؛ تئودوسیو، ۱۹۹۹؛ دسباراتس و همکاران، ۲۰۰۲؛ کائیرو و همکاران، ۲۰۰۳؛ گاندوگو و گانی، ۲۰۰۷؛ کومار، ۲۰۰۷؛ اختری و همکاران، ۱۳۸۵؛ دیانی و همکاران، ۱۳۸۸؛ جلالی و همکاران؛ ۱۳۹۲). وولد و بوگرادی (۱۹۹۲) از روش کریجینگ چندمتغیره برای ارزیابی طراحی شبکه پایش آب زیرزمینی استفاده کردند و استفاده از این روش را برای توسعه شبکه در فازهای ابتدایی و انتهایی مناسب دانستند. در تحقیقی اولئا و دیویس (b۱۹۹۹) به‌منظور تکمیل شبکه مشاهده‌ای سطح آب زیرزمینی پیشنهاد کردند که شبکه در مناطقی که انحراف استاندارد کریجینگ، افزایش عدم قطعیت نشان می‌دهد، توسعه داده شود. پراکاش و سینگ (۲۰۰۰)، با استفاده از روش کریجینگ، مکان‌هایی را که دارای بیشترین واریانس خطا بودند، برای اضافه کردن چاه‌های جدید مناسب اعلام کردند. یئه و همکاران (۲۰۰۶) به‌منظور طراحی بهینه شبکه پایش چندمتغیره کیفی آب زیرزمینی، به کارایی قابل‌قبول روش کریجینگ فاکتوریل اشاره دارند. احمد و همکاران (۲۰۰۸) از روش زمین‌آمار به‌منظور بهینه‌سازی شبکه پایش آب زیرزمینی در آبخوان‌های ناهمگن استفاده کردند. آنان همچنین با ارزیابی شبکه به روش آماری ارزیابی متقابل، اولویت‌بندی چاه‌ها در فرایند پیش‌بینی را عملی ساختند. نابی و همکاران (۲۰۱۱) به‌منظور بهینه‌سازی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی در یکی از آبخیزهای هند از ترکیب مشاهدات صحرایی و تحلیل‌های زمین‌آمار استفاده کردند. طبق نتایج، این رویکرد برای افزایش جمع‌آوری داده‌ها و مشارکت در مدیریت بهتر تخصیص منابع در شرایط محدودیت بودجه مفید است. بات و همکاران (۲۰۱۲) با تهیه مدل نیم‌تغییرنگار پایش سطح آب زیرزمینی در فلوریدا نتیجه گرفتند که به‌منظور کاهش خطای پیش‌بینی باید پایش با تعداد بیشتری از چاه‌های مشاهده‌ای صورت گیرد. خیری (۱۳۸۹) از روش کریجینگ در دو مرحله به‌منظور طراحی بهینه شبکه اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی استفاده کرد. در مرحله اول چاه‌های مشاهده‌ای غیرضروری تشخیص داده شد و حذف شد. در مرحله دوم با استفاده از نقشه توزیع انحراف معیار، چاه‌های مشاهده‌ای مطلوب اضافه شد. همچنین نتایج روشن ساخت که استفاده از روش کریجینگ در برآورد توزیع سطح آب زیرزمینی، موجب دقیق‌تر شدن مقادیر ارتفاع سطح آب زیرزمینی در نقاط فاقد اندازه‌گیری می‌شود.

نتایج سوابق تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از زمین‌آمار و به‌خصوص روش کریجینگ توانسته کارایی خوبی در پیش‌بینی و پایش منابع آب زیرزمینی داشته باشد. همچنین نحوه پراکنش داده‌های مشاهده‌ای و کفایت آنها با این روش قابل بررسی است؛ البته در تحقیقات داخلی کمتر به این موضوع پرداخته شده است. اهمیت موضوع در حالی است که در دشت‌های حاصلخیز کشور که قابلیت زیادی برای کشت محصولات زراعی گوناگون با توجه به نوع اقلیم دارند، باید شبکه‌های پایش سطح آب زیرزمینی به‌خوبی مدیریت شود. چرا که مهم‌ترین منبع آب کشاورزی در دشت‌ها، از منابع آب زیرزمینی به‌خصوص چاه تأمین می‌شود. دشت اراک در حوزه آبخیز تالاب کویری میقان، یکی از دشت‌های

www.SID.ir

Archive of SID

دارای قابلیت زیاد در بخش کشاورزی و صنعت است. با توجه به اهمیت موضوع در این تحقیق، کفایت شبکه‌های مشاهده‌ای در پایش سطح آب زیرزمینی با استفاده از تحلیل‌گر زمین‌آماری کریجینگ در منطقه مطالعاتی دشت اراک بررسی شده است. همچنین به‌منظور بررسی صحت و دقت برآوردها، از چند روش آماری در قالب معیارهای ارزیابی مدل استفاده شده است تا توسعه شبکه پایش سطح آب زیرزمینی شفاف‌تر مورد ارزیابی قرار گیرد.

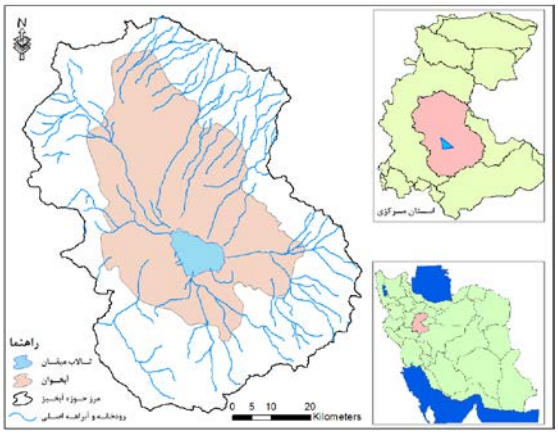
۲ روش تحقیق

۲-۱ منطقه مورد بررسی

حوزه آبخیز تالاب میقان با مساحت تقریبی ۵۵۰۰ کیلومترمربع، با مختصات جغرافیایی °۴۹ و '۲۲ تا °۵۰ و '۲۹ طول شرقی و °۳۳ و '۴۹ تا °۳۴ و '۴۶ عرض شمالی در استان مرکزی واقع است. با توجه به شکل ۱، این حوضه به شکل بسته است و همهٔ جریان‌های سطحی آن به تالاب میقان (با مساحت ۱۱۰ کیلومتر مربع) منتهی می‌شود. ارتفاع بیشینه این حوضه ۳۱۱۸ متر، ارتفاع کمینه ۱۶۶۰ متر، ارتفاع متوسط ۱۹۲۶ متر، و شیب متوسط سطح ۱/۹۷ درصد است. تغییرات بارندگی سالانه از حدود ۲۱۰ تا ۴۳۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه تقریباً ۱۲/۲ درجه سلسیوس است (مهندسان مشاور قدس نیرو، ۱۳۸۳). لازم به ذکر است آبخوان اراک از نوع نامحصور با مساحت ۱۹۴۶ کیلومتر مربع است که تعداد ۱۴۵۸ چاه عمیق و ۱۵۵۴ چاه نیمه عمیق در دشت اراک قرار دارد و مجموع تخلیه کل چاه‌های پیش‌گفته در حدود ۷۰۲ میلیون مترمکعب در سال است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۰).

۲-۲ تهیه نیم‌پراش‌نما

با توجه به شکل ۲، به‌منظور پردازش داده‌ها، مقادیر سطح ایستابی ۴۵ چاه تحقیقی دشت اراک به‌همراه موقعیت آنها از شرکت سهامی آب منطقه‌ای مرکزی جمع‌آوری شد. شرط استفاده از تحلیل‌های زمین‌آماری این است که داده‌ها توزیع نرمال داشته باشند و از طرفی مقادیر میانگین و واریانس خیلی از هم دور نباشند (راهنمای تحلیل‌گر زمین‌آمار، ۲۰۱۰). ازاین‌رو ابتدا نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگوروف- اسمیرنوف بررسی شد و بعد از آن داده‌ها وارد نرم‌افزار Surfer 8.0 شد. سپس بهترین نیم‌پراش‌نمای روش کریجینگ براساس ضریب تعین (R^2) و مجموع مربعات مانده‌ها (Residuals sum square) انتخاب شد.



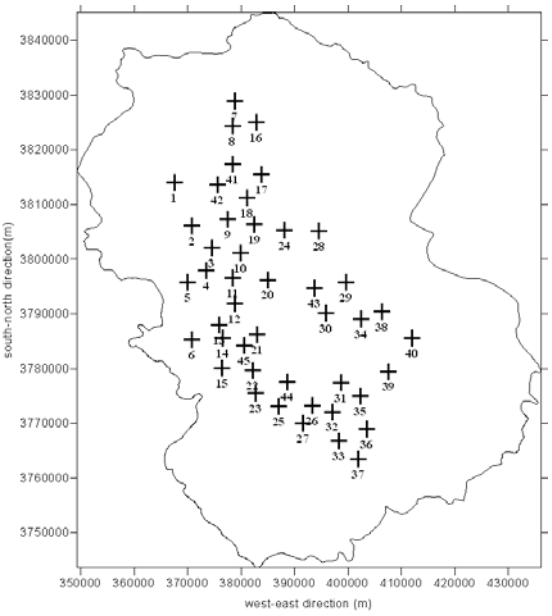
شکل ۱. موقعیت حوزه آبخیز تالاب میقان.

در روش کریجنگ پس از اندازه‌گیری مقدار متغیر برای نمونه‌های متعدد همراه با در نظر گرفتن موقعیت آنها، مقدار متغیر در نقاط نمونه‌برداری نشده نیز با توجه به موقعیت فاصله آنها و فاصله‌ای که با نقاط معلوم دارند برآورد می‌شود.

این امر در عمل با رسم پراش‌نما یا تغییرنگار (Variogramm) که در واقع بیانگر ساختار واریانس نمونه‌های معلوم برداشت شده نسبت به فواصل آنها است و ساختار تغییرپذیری نسبت به فاصله مکانی یا زمانی را نشان می‌دهد، صورت می‌گیرد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲. موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای در حوزه آبخیز تالاب میقان.

فرمول محاسبه تغییرنگار به‌صورت زیر است (حسنی پاک، ۱۳۷۷؛ باقری بداغ آبادی، ۱۳۸۴):

$$2\gamma(h)=\frac{1}{N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x+h)-Z(x)]^2, \qquad (۱)$$

که در آن Z(x) و Z(x+h) مقادیر نمونه‌ها در موقعیت‌های x و x+h و N(h) تعداد زوج مشاهدات در هر فاصله h است. در رابطه فوق γ(h) را سمی‌واریانس (Semi-variance) می‌نامند. معمول‌ترین روش کریجینگ از نوع معمولی است که در این تحقیق نیز از آن استفاده شده است. در این روش فرض بر این است که میانگین ثابت است؛ ولی مقدار آن مشخص نیست. لذا متغیر ناحیه‌ای در فضای برآورد مقداری نامعلوم است. در عمل با رسم مقادیر سمی‌واریانس روی محور قائم به‌ازای فواصل متفاوت h، سعی می‌شود که بهترین مدل منطبق بر داده‌ها انتخاب و رسم شود و منحنی تغییرنگار به‌دست آید.

۲-۳ ارزیابی مدل

پس از انتخاب مدل زمین‌آمار کریجینگ، ارزیابی شبکه مشاهده‌ای سطح آب زیرزمینی براساس سه روش آماری به شرح زیر صورت گرفت.

مقدار خطای برآورد: خطای درونیابی روی نقاط مشاهده‌ای صفر بوده و مقدار این خطا با افزایش عدم قطعیت برآورد و یا با کاهش تراکم شبکه مشاهده‌ای و یا دور شدن از نقاط اندازه‌گیری، افزایش می‌یابد (حسنی پاک، ۱۳۷۷). ازآنجاکه مقدار خطای برآورد شده معمولاً عددی از پیش تعریف شده است، لذا اعداد کوچک‌تر و بزرگ‌تر از آن، در تعیین وسعت منطقه مورد بررسی تأثیر دارند. در این تحقیق نیز با توجه هدف طرح و ارزیابی‌های اقتصادی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی دشت اراک، مقدار ۷۰ متر درحکم مقدار آستانه برای خطای برآورد در نظر گرفته شد.

ارزیابی متقابل (Cross Validation): به‌منظور اطمینان از نبود خطاهای سامان‌مند از این روش استفاده می‌شود (فیلیپ و کیتانیدیس، ۱۹۸۹؛ جولی و همکاران، ۲۰۰۵). واضح است که اختلاف کمتر بین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی، مبین اهمیت کمتر آن نقاط مشاهده‌ای برای برآورد توزیع سطح آب زیرزمینی است. در این تحقیق با تعیین اختلاف مقادیر سطح آب زیرزمینی مشاهده‌ای و برآوردی با آستانه ۲۰ متر، این ارزیابی صورت گرفت؛ لذا در مناطقی که اختلاف کمتر از این آستانه باشد، مناطق مستعد برای حذف چاه (های) مشاهده‌ای مشخص می‌شود.

وردش زمانی (Time Variation): وردش (تغییرپذیری) سطح آب با زمان مبین نقاط مشاهده‌ای است که لزوماً نیازی نیست که آن نقاط در همهٔ دوره‌ها اندازه‌گیری شوند. بنابراین می‌توان به‌منظور صرفه‌جویی در زمان و هزینه، اندازه‌گیری را در این نقاط مشاهده‌ای که تغییرپذیری کم است، حذف کرد. به‌منظور شناسایی

www.SID.ir

Archive of SID

تغییرپذیری سطح آب زیرزمینی با زمان از انحراف استاندارد استفاده شد. بدین صورت که با مقایسه انحراف استاندارد مقادیر برآوردی سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳، چاه‌هایی که در هر دو سال تحقیقاتی کمترین انحراف استاندارد را داشتند درحکم نقاط مستعد حذف برای نمونه‌برداری دوره‌ای معرفی شدند.

همچنین با هم‌پوشانی سه نقشه حاصل از معیارهای فوق، مناطقی که شبکه مشاهده‌ای نیازمند توسعه بیشتر و یا کاهش و تنک شدن است تعیین شد؛ به‌طوری‌که مناطق تنک‌تر که بیانگر عدم قطعیت مکانی کمتر بودند، به‌منظور کاهش تعداد چاه‌های شبکه پایش شناسایی شدند. علاوه‌براین، در این مناطق، نقاط مشاهده‌ای که در طول زمان دارای تغییرات کمتری بودند، به‌منظور نمونه‌برداری دوره‌ای مشخص شدند.

۳ نتایج و بحث

جدول ۱ آماره‌های توصیفی تراز آب زیرزمینی ۴۵ چاه مشاهده‌ای را نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج، اختلاف تراز آب زیرزمینی در حدود ۲۰ متر و میانگین تراز آب زیرزمینی دشت اراک حدود ۱۷۰۷ متر از سطح دریا است. همچنین با توجه به آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف، P-value بیشتر از ۰/۰۵ و دال بر اثبات فرض H_o و نرمال بودن داده‌ها است.

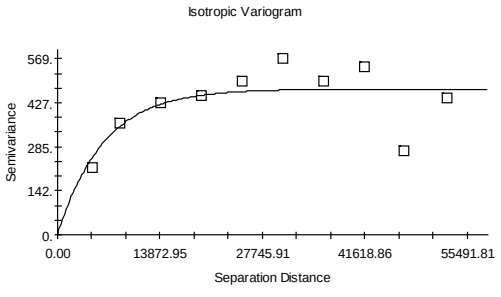
شکل ۳ تغییرنگار روش کریجینگ معمولی و جدول ۲ مشخصات آن را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، نیم‌پراش‌نمای تجربی (Exponential) بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقدار RSS را برای مدل نیم‌تغییرنگار داشت.

در تحلیل مؤلفه‌های نیم‌پراش‌نما، وابستگی مکانی از راه نسبت اثر قطعه‌ای (Nugget) به حد آستانه (Sill) بیان می‌شود. هرگاه این نسبت کمتر از ۲۵ درصد باشد، نشان‌دهنده وابستگی مکانی زیاد؛ بین ۲۵ تا ۷۵ درصد بیانگر وابستگی مکانی متوسط؛ و بیش از ۷۵ درصد بیانگر

جدول ۱. شاخص‌های آماری توصیفی و آزمون نرمال بودن داده‌ها.

تعداد چاه	۴۵
کمینه تراز (متر)	۱۶۶۳
بیشینه تراز (متر)	۱۸۶۳
میانگین (متر)	۱۷۰۷
انحراف معیار	۴۷/۹
P-value معنی‌داری	۰/۱۰۳

وابستگی مکانی ضعیف است. همچنین از معیار نسبت مؤلفه ساختاردار نیم‌تغییرنگار به آستانه $(C/(C_o+C))$ نیز برای بیان وجود ساختار فضایی استفاده شده است. اگر مقدار این معیار کوچک‌تر از ۰/۵ باشد، نقش مؤلفه بی‌ساختار بیشتر از مؤلفه‌های دارای ساختار است و در نتیجه ساختار فضایی ضعیف تلقی می‌شود (وود و همکاران، ۱۹۹۰). با توجه به مدل نیم‌پراش‌نمای تحقیق، نسبت اثر قطعه‌ای به حد آستانه برابر ۰/۲۲ و نسبت مؤلفه ساختاردار نیم‌تغییرنگار به آستانه تقریباً برابر یک و بیانگر وابستگی مکانی تراز آب زیرزمینی دشت اراک است و خودهمبستگی نسبت به فاصله مکانی را نشان می‌دهد؛ بنابراین به علت وابستگی مکانی، ناهمسانگردی در جهت‌های گوناگون وجود دارد.



شکل ۳. تغییرنگار نیم‌پراش‌نمای تجربی برای داده‌های سطح آب زیرزمینی دشت اراک.

www.SID.ir

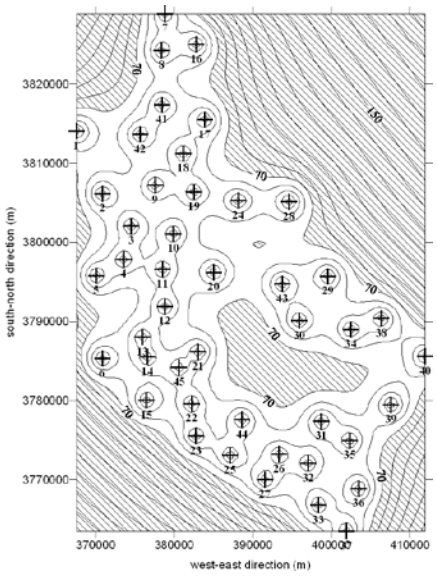
Archive of SID

جدول ۲. مؤلفه‌های نیم‌پراش‌نما برای داده‌های سطح آب زیرزمینی دشت اراک.

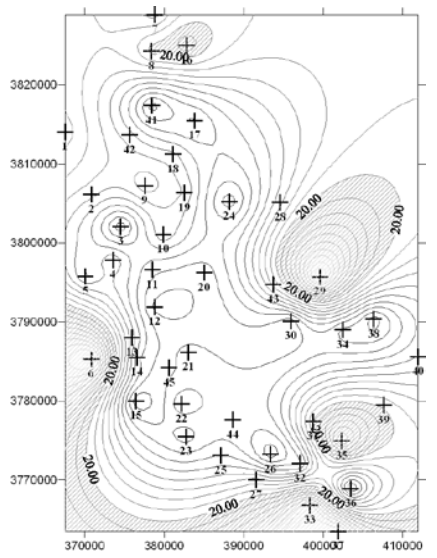
مدل	تجربی
R^2	۰/۴۹۰
RSS	۵۹۸۳۹
اثر قطعه‌ای	۱
آستانه	۴۷۱/۴
دامنه	۶۲۰۰

در شکل ۴ متوسط مربع خطای درونیابی مدل نشان داده شده است. با توجه به این شکل، حاشیه‌های منطقه مورد بررسی، مبین خطای برآورد معنی‌داری و جذر میانگین مربع خطا بیش از ۷۰ متر است. بخش هاشورخورده مرکز نقشه نیز مربوط به تالاب میقان و فاقد نمونه‌برداری است.

در شکل ۵ توزیع اختلاف‌های بین مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه‌ای سطح آب زیرزمینی در حالت‌های گوناگون براساس روش ارزیابی متقابل نشان داده شده است. نقاط مشاهده‌ای واقع در داخل مناطقی که اختلاف بین سطح-های آب زیرزمینی مشاهده‌ای و برآوردی در آنها قابل‌ملاحظه است، از نظر برآورد توزیع سطح آب مهم هستند. بنابراین در مناطقی که اختلاف مقادیر محاسباتی و مشاهده‌ای کم باشد، می‌توان اقدام به کاهش تعداد نقاط مشاهده‌ای کرد. این موضوع با آستانه اختلاف ۲۰ متر در اطراف چاه‌های ۶، ۲۹، ۳۵ و ۳۶ قابل مشاهده است. با در نظر گرفتن موضوع کاهش نقاط مشاهده‌ای، اقدام به حذف یک به یک نقاط مستعد شامل چاه‌های ۳، ۱۵، ۲۴، ۲۶ و ۳۸ از شبکه پایش و رسم مجدد نقشه توزیع خطا طبق شکل ۶ شد. مشخص می‌شود که حذف این نقاط مستعد، در افزایش خطای برآورد تأثیرگذار نبوده است.



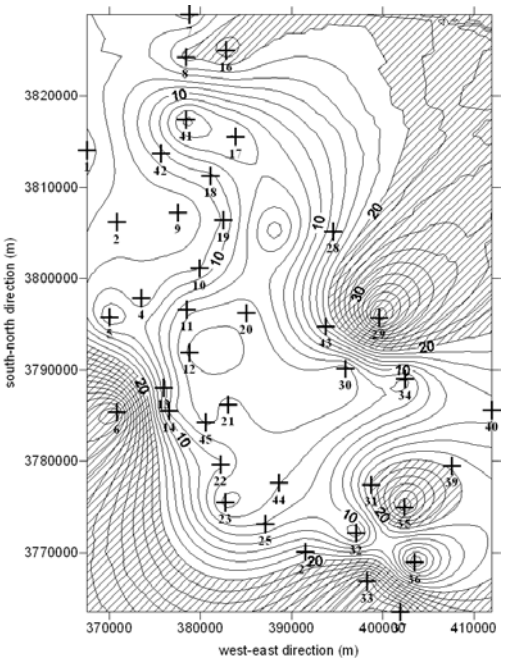
شکل ۴. توزیع جذر میانگین مربع خطای برآورد بالای ۷۰ متر.



شکل ۵. توزیع اختلاف‌های بین مقادیر سطح ایستابی مشاهداتی و برآوردی بالای ۲۰ متر.

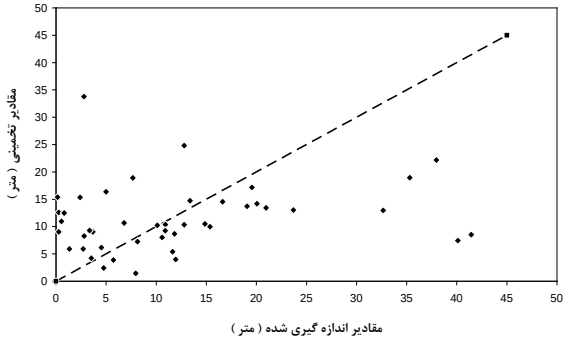
www.SID.ir

Archive of SID



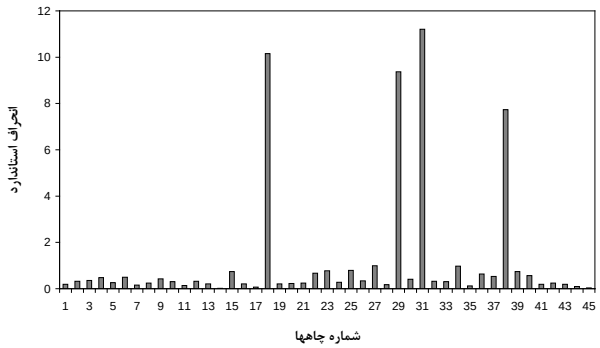
شکل ۶. توزیع اختلاف بین مقادیر سطح ایستابی مشاهداتی و برآوردی بعد از حذف چاه‌های مستعد.

در شکل ۷ همبستگی بین مقادیر برآوردی و مشاهده‌ای نشان داده شده است. وجود نقاط دورافتاده نشان از نادرستی اندازه‌گیری‌های میدانی و یا تراکم کم چاه‌های مشاهده‌ای در آن منطقه است. این همبستگی با توزیع اختلاف‌ها در شکل ۵ ارتباط دارد. به‌طوری‌که چاه‌های ۶، ۲۹، ۳۵ و ۳۸ دور از خط Y=X هستند. لذا این چاه‌ها در منطقه‌ای تقریباً کم‌تراکم قرار گرفته‌اند.

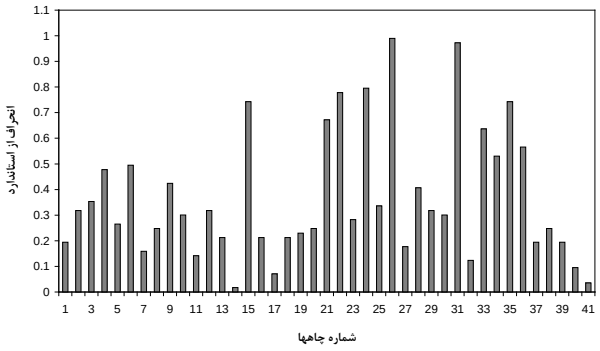


شکل ۷. همبستگی بین مقادیر برآوردی و مشاهده‌ای.

شکل‌های ۸ و ۹ تغییرپذیری سطح آب را در طی دوره‌های زمانی اندازه‌گیری در سال ۸۳-۱۳۸۲ نشان می‌دهد. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود، انحراف استاندارد نقاط ۷، ۱۱، ۱۴، ۱۷، ۲۷، ۳۲، ۳۷، ۳۹، ۴۰ و ۴۱ در هر دو شکل کمتر از نقاط دیگر است. بنابراین می‌توان اندازه‌گیری در این نقاط مشاهده‌ای را که تغییرپذیری کمی نشان می‌دهند، به‌منظور صرفه‌جویی در زمان و هزینه حذف کرد. بااین‌حال مطابق با تحقیقات اولئا و دیویس (b۱۹۹۹)، در مناطقی که برآوردهای روش کریجینگ با عدم قطعیت زیاد مواجه است، بایستی نمونه‌برداری‌ها با دقت بیشتری همراه باشد.



شکل ۸. تغییرپذیری سطح آب زیرزمینی با زمان در سال ۱۳۸۲.



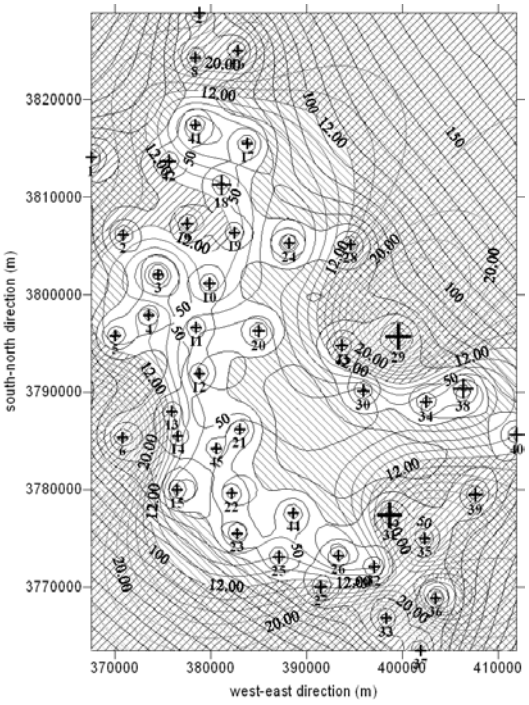
شکل ۹. تغییرپذیری سطح آب زیرزمینی با زمان در سال ۱۳۸۳.

شکل ۱۰ ترکیب نتایج تحلیل‌های آماری روش کریجینگ را نشان می‌دهد. در مناطقی که عدم قطعیت زیاد است (مناطق پر)، شبکه مشاهده‌ای سطح آب

www.SID.ir

Archive of SID

زیرزمینی نیازمند تراکم بیشتری است. این نتایج مطابق با نتایج تحقیق خیری (۱۳۸۹) است؛ کما اینکه در این تحقیق از شاخص‌های ارزیابی بیشتری برای شفاف‌سازی توسعه شبکه پایش سطح آب زیرزمینی استفاده شده است. در تحقیقات پراکاش و همکاران (۲۰۰۰)، بات و همکاران (۲۰۱۲) نیز به به‌منظور کاهش خطای برآورد، افزایش تعداد چاه‌ها و متراکم شدن شبکه پایش پیشنهاد شده است. طبق نتایج شکل ۱۰، در مناطقی که عدم قطعیت کمتری دارند (مناطق خالی)، می‌توان از چاه‌ها نمونه-برداری دوره‌ای داشت. برای تصور بهتر، این موضوع با اندازه‌های متفاوت علامت + که موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای را نشان می‌دهند، نمایش داده شده است. اندازهٔ بزرگ‌تر نماد، مبین تغییرپذیری بیشتر اندازه‌گیری‌های سطح آب زیرزمینی نسبت به زمان است. چاه‌هایی که با علامت‌های کوچک نماد مشخص شده‌اند، بیانگر مناطق با عدم قطعیت کمتر هستند که در آنجا می‌توان با تواتر کمتر (فواصل زمانی طولانی‌تر) نمونه‌برداری از سطح آب زیرزمینی را عملی ساخت.



شکل ۱۰. ترکیب نتایج حاصل از تحلیل‌های آماری در روش کریجینگ.

۴ نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج و مباحث، جمع‌بندی تحقیق در چند نکته قابل بیان است.

بر مبنای خطای برآورد، مناطق حاشیه‌ای دشت اراک در حوزه آبخیز تالاب میقان، دارای عدم قطعیت بیشتر برآورد سطح آب زیرزمینی است. عدم قطعیت در این مناطق عمدتاً به علت فقدان نقاط مشاهده‌ای به‌وجود آمده است و لزوماً ناشی از ناسازگاری سنجش‌های موجود در همسایگی آن مناطق نیست. این مناطق نشان می‌دهند که شبکه مشاهده‌ای نیازمند توسعه است و ضرورت دارد که شبکه مشاهده‌ای در آن مناطق متراکم‌تر شود.

بر مبنای ارزیابی متقابل، در مورد چاه‌های ۶، ۲۹، ۳۵ و ۳۶ وجود افزایش اختلاف بین سطوح آب مشاهده‌ای و برآوردی باعث شده است که عدم قطعیت حاصل به بخش نسبتاً بزرگی از محدوده این چاه‌ها سرایت کند. بنابراین، چاه‌های مشاهده‌ای واقع در آن مناطق خیلی اهمیت دارند و نشانگر مناطقی هستند که شبکه مشاهده‌ای نیازمند تراکم بیشتری است. اگرچه نمی‌توان امکان اندازه‌گیری‌های نادرست را حذف کرد اما محتمل‌ترین پاسخ این است که شبکه مشاهده‌ای نیازمند این است که در آن نقطه معین متراکم‌تر شود و این تراکم‌پذیری در حواشی دشت اراک باید بیشتر باشد. همچنین قرار گرفتن تالاب کویری میقان در مرکز پهنه مطالعاتی علتی بر ایجاد ناهمسانگردی در جهت‌های گوناگون است که بایستی در برنامه‌های مدیریتی و اجرایی شبکه پایش مدنظر باشد.

از طرف دیگر، نقاط مشاهده‌ای واقع در داخل مناطقی که اختلاف مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده کوچک است را می‌توان از شبکه مشاهده‌ای حذف کرد. در این تحقیق نقاط مشاهده‌ای ۳، ۱۵، ۲۴، ۲۶ و ۳۸ را که عمدتاً در نیمه غربی تا شمالی منطقه مورد بررسی هستند، می‌توان از شبکه مشاهده‌ای حذف کرد؛ زیرا که مشارکت این چاه‌ها در برآورد توزیع سطح آب زیرزمینی در آبخوان

www.SID.ir

Archive of SID

اراک معنی‌دار نیست. به‌این‌ترتیب هم از نظر هزینه و هم از نظر زمان موردنیاز برای هر اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی، صرفه‌جویی خواهد شد؛ بدون اینکه نقصان معنی‌داری در اطلاعات حاصل شود. البته لازم است که در موقع حذف نقاط، دقت بسیار زیادی به خرج داد، زیرا ممکن است در اثر حذف، شاهد افزایش غیرمنتظره در اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی باشیم.

بر مبنای تغییرپذیری زمانی، به علت تغییرات کمتر انحراف استاندارد در سطح ایستابی چاه‌های ۷، ۱۱، ۱۴، ۱۷، ۲۷، ۳۲، ۳۷، ۳۹، ۴۰ و ۴۱ می‌توان نمونه‌برداری در این چاه ها را در فواصل زمانی بیشتر به انجام رساند تا منجر به مدیریت هزینه و زمان شود.

با توجه به ترکیب نتایج حاصل از تحلیل‌های آماری در روش کریجینگ، مشخص شد که نیمه غربی منطقه مورد بررسی در راستای شمال تا جنوب، برای ارزیابی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی مناسب است. این در حالی است که در حاشیه‌ها به‌خصوص در شمال شرق دشت اراک، ارزیابی و توسعه شبکه، نیازمند نقاط نمونه‌برداری بیشتر است.

روش پیشنهادی در این تحقیق را نه فقط می‌توان در تطابق و ممیزی مدل درونیابی به کار برد، بلکه به‌منظور ارزیابی و بهینه‌سازی شبکه مشاهده‌ای نیز می‌توان از آن استفاده کرد. لازم به ذکر است که ضمن در نظر گرفتن مطالب فوق، ضرورت دارد که در ابتدا شبکه مشاهده‌ای براساس یک توزیع مناسب در سراسر منطقه مورد بررسی گسترش یابد. سپس بعد از جمع‌آوری داده‌های موردنیاز، با به‌کارگیری روش‌های زمین‌آماری مناسب و ترکیب نتایج حاصل از خطای برآورد درونیابی، پیش‌بینی‌پذیری هر اندازه‌گیری و تغییرپذیری سطح آب با زمان، نسبت به بهینه‌سازی شبکه اقدام کرد. به‌این‌ترتیب که با داشتن نقاط مشاهده‌ای واقعاً ضروری و همچنین در نظر گرفتن بسامد اندازه‌گیری موردنیاز، می‌توان سامانهٔ آبخوان را به‌خوبی مدیریت کرد.

منابع

اختری، ر.، مهدیان، م. ح.، مرید، س.، ۱۳۸۵، تحلیل مکانی شاخص‌های خشکسالی SPI و EDI در استان تهران: مجله تحقیقات منابع آب ایران، **۲**(۳)، ۲۷-۳۹.

باقری بداغ آبادی، م.، امینی فسخودی، ع.، اسفندیارپور، ع.، ۱۳۸۴، پهنه‌بندی شوری خاک به‌منظور کاربری محیطی فضای سبز با استفاده از تکنیک AHP و اصول زمین آماری (جزیره کیش): مجله پژوهشی علوم انسانی، **۲۲**(۱)، ۱۰۱-۱۱۶.

جلالی، ق.، طهرانی، م.م.، برومند، ن.، سنجری، ص.، ۱۳۹۲، مقایسه روش‌های زمین‌آمار در تهیه نقشه پراکنش مکانی برخی عناصر غذایی در شرق استان مازندران: مجله پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب)، **۲۷**(۲)، ۱۹۵-۲۰۴.

حسنی پاک، ع.، ۱۳۷۷، زمین‌آمار (ژئواستاتیستیک): انتشارات داتشگاه تهران.

خیری، ه.، ۱۳۸۹، گزارش نهایی بهینه‌سازی شبکه پایش آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های زمین‌آماری (مطالعه موردی دشت قائمشهر-جویبار): شرکت سهامی آب منطقه‌ای مازندران.

دیانی، م.، محمدی، ج.، و نادری، م.، ۱۳۸۸، تجزیه و تحلیل زمین‌آماری غلظت سرب، روی و کادمیم در خاک‌های حومه سپاهان شهر واقع در جنوب اصفهان: نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، **۲۳**(۴)، ۶۷-۷۶.

شرکت مدیریت منابع آب، ۱۳۸۴، دستورالعمل رفتارسنجی کمی آب‌های زیرزمینی: وزارت نیرو.

شرکت مدیریت منابع آب، ۱۳۹۰، پیش‌نویس

www.SID.ir

Archive of SID

دستورالعمل پایش کیفیت آب‌های زیرزمینی: وزارت نیرو.

کایدانی، م.، و دلبری، م.، ۱۳۹۱، پهنه‌بندی شوری خاک و ارزیابی ریسک شوری در منطقه میانکنگی (سیستان) با استفاده از روش‌های زمین آماری: علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی)، **۳۵**(۱)، ۴۹-۵۹.

محمدی قلعه‌نی، م.، ابراهیمی، ک.، و عراقی نژاد، ش.، ۱۳۹۰، ارزیابی کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان‌های ساوه و اراک): مجله دانش آب و خاک، **۲۱**(۲)، ۹۳-۱۰۸.

مهندسان مشاور قدس نیرو، ۱۳۸۳، مطالعات کیفی و آلودگی محدوده مطالعاتی دشت اراک: گزارش هیدرولوژی، جلد دوم، سازمان آب منطقه‌ای تهران.

نیک‌بخت، ج.، محمدی، ک.، و احتشامی، م.، ۱۳۸۶، برآورد تبخیر- تعرق واقعی گیاه در سطح احتمالاتی متفاوت: مطالعه موردی در مراغه، آذربایجان شرقی: مجله علمی- پژوهشی علوم کشاورزی، **۱۳**(۱)، ۹۵-۱۰۶.

Ahmed, S., Kumar, D., and Bhat, A.N., 2007, Application of geostatistics in optimal groundwater monitoring network design: In Ahmed, S., Jayakumar, R. and Salih, A. (Eds.) Groundwater Dynamics in Hard Rock Aquifers, Capital Pub. Co., New Delhi, 179-190.

Bhat, S., Motz, L., Pathak, C., and Kuebler, L., 2012, Designing a groundwater-level monitoring network using geostatistics: A case study for south and central Florida, USA: World environmental and water resources congress, 48–58.

Bouma, J., Booltink, H.W.G., and Finke, P.A., 1996, Use of soil survey data for modeling solute transport in the Vadoze: J. Environ. Qual. **25**, 519–526.

Caeiro, S., Painho, M., Goovaerts, P., Costa, H., and Sousa, S., 2003, Spatial sampling design for sediment quality assessment in estuaries: Environmental Modeling & Software, **18**, 853–859.

Desbarats, A.J., Logan, C.E., Hinton, M.J., and Sharpe, D.R., 2002., On the Kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model: J. Hydrology, **255**, 25–38.

Geostatistical Analyst Tutorial, 2010, Esri All rights reserved.

Gundogdu, K.S. and Guney, I., 2007, Spatial analyses of groundwater level using universal Kriging: J. Earth System Science, **116**, 49–55.

Hilip, R.D., and Kitanidis, P.K., 1989, Geostatistical estimation of hydraulic head gradients: Ground Water, **25**, 672–678.

Jolly, W.M., Graham, J.M., Michaelis, A., Nemani, R., and Running, S.W., 2005, A flexible, integrated system for generating meteorological surfaces derived from point sources across multiple geographic scales: Environmental Modelling & Software, **20**, 873–882.

Kumar, V., 2007, Optimal contour mapping of groundwater levels using universal kriging — a case study: Hydrological Sciences Journal, **52**, 1038-1050.

Nabi, A., Gallardo, A. H., and Ahmed, S., 2011, Optimization of a groundwater monitoring network for a sustainable development of the Maheshwaram catchment, India: Sustainability, **3**: 396–409.

Olea, R., and Davis, J., 1999a, Optimizing the High Plains aquifer water-level observation network: K.G.S. Open File Report.

Olea, R., and Davis, J., 1999b, Sampling analysis and mapping of water levels in the High Plains aquifer of Kansas: K.G.S. Open File Report.

Prakash, M., and Singh, V., 2000, Network design for groundwater monitoring. A case study: Environmental Geology, **39**, 628–632.

Theodossiou, N., 1999, Evaluation of the distribution of hydraulic head in an aquifer using the Kriging method: Scientific Journal of the Hellenic Hydrotechnical Association-Hydrotechnika, **9**, 3–14.

Woldt, W., and Bogardi, I., 1992, Ground water monitoring network design using multiple criteria decision making and geostatistics: J. the American Water Resources Association, **28**(1), 45–62.

Wood, G., Oliver, M., and Webster, R., 1990, Estimating soil salinity by disjunctive Kriging: Soil Use and Management, **6**, 97–104.

Xu, C., Gong, L., Jiang, T., Chen, D., and Singh, V.P., 2006, Analysis of spatial distribution

www.SID.ir

Archive of SID

geostatistical groundwater quality monitoring network using factorial Kriging and genetic algorithms: Environmental Geology, **50**, 101–121.

and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment: J. Hydrology, **327**, 81–93.

Yeh, M.S., Lin, Y.P., and Chang, L.C., 2006, Designing an optimal multivariate

www.SID.ir