

# کاربرد زمین آمار در ارزیابی شبکه‌های پایش کیفی آب زیرزمینی

بیزن قهرمان

استادیار

دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

سید محمود حسینی

استادیار

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

حمیدرضا عسگری

کارشنای ارشد

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

## چکیده

در حال حاضر ۹۰ درصد نیاز آبی مصرفی شهر مشهد از چاه‌های عمیق تامین می‌شود که نشان دهنده اهمیت بررسی کیفی این منبع تأمین آب می‌باشد. برای تعمیم نتایج اندازه‌گیری از چاه‌های موجود به سایر نقاط فاقد آمار بایستی شبکه چاه‌ها از تراکم مناسبی برخوردار باشد. در این بررسی ارزیابی کفایت شبکه چاه‌های آب شرب شهر مشهد در ردیابی نیترات و هدایت الکتریکی با استفاده از کریجینگ، که یک روش میان‌یابی بهینه بین آمارهای اندازه‌گیری شده بر پایه تشخیص ساختار مکانی است، انجام پذیرفته است. با بررسی کمیت و کیفیت اطلاعات در دسترس، آخرین آمار موجود در سال ۷۹ از ۹۲ چاه که در اعماق بین ۱۶۰ تا ۲۵۰ متر در آنها اندازه‌گیری صورت گرفته بود، مبنای تجزیه و تحلیل مکانی قرار گرفتند. بر مبنای تجزیه و تحلیل مکانی، مناسب‌ترین مدل نیم تغییرنا برای نیترات مدل نمایی (پس از برازش یک رویه درجه دوم برای حذف روند) و برای هدایت الکتریکی مدل خطی سقف‌دار بدست آمد. نقشه‌های توزیع مقدار و خطای تخمین این پارامترهای کیفی، تهیه شده به روش کریجینگ معمولی و نقطه‌ای، نشان دادند که به طور کلی نیترات از تغییر پذیری بالاتری نسبت به هدایت الکتریکی برخوردار بود و خطای برآورد بالاتری داشت. با این وجود توزیع خطای برآورد برای هر کدام از پارامترها در کل منطقه تغییرات کمی داشت. برای هر پارامتر سه محل چاه پیشنهادی ارائه شد که بتوانند موجب کاهش حداکثر خطای برآورد شود. نتایج نشان داد که این سه چاه در حاشیه ناحیه تحت مطالعه قرار دارند و تنها قادر هستند حداکثر خطای برآورد را کمتر از ۳ درصد کاهش دهند. این مقدار کاهش در خطا قابل توجه نمی‌باشد و لذا بنظر می‌رسد که عملکرد شبکه فعلی با توجه به نوع اطلاعات در دسترس قابل تغییر نمی‌باشد. علیرغم این مسئله با توجه به میزان خطاها طرح یک شبکه موثرتر که توزیع مکانی (سطحی و عمقی) و زمانی مناسب‌تری داشته باشد احساس می‌گردد.

## کلمات کلیدی

زمین آمار، کریجینگ، طراحی شبکه اندازه‌گیری، آب زیرزمینی، نیترات، هدایت الکتریکی، مشهد.

## Use of Geostatistics in Evaluation of Groundwater Quality Monitoring Networks

B. Ghahraman

Assistant Professor

Irrigation Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

S. M. Hosseini

Assistant Professor

Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

H. R. Asgari

Former Graduate Student

Civil Engineering (water Resources),  
Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

## Abstract

*At present about 90% of Mashhad water consumption is supplied by deep wells. This high level of consumption indicates the importance for monitoring groundwater quality in this area. There is a need for a dense network to be able to extend the point data to unged locations. The adequacy of Mashhad water supply deep well network for monitoring nitrate and electrical conductivity (EC) has been investigated in this research by kriging, which is an optimal interpolation technique based on spatial structure of data. An exponential model of semivariogram was fitted to nitrate data (after removing its trend by a second order equation), while EC data showed a linear-sill one. On the whole, nitrate was more variable than EC with higher error of estimate. However, the error maps showed that the variation of error was not so great in the study area for both parameters. Three new well locations were proposed for decreasing the maximum error of estimates. These locations were around the boundaries of the study and reduced the maximum error by less than 3%. Such a reduction is quite insignificant; illustrating that based on the available data the performance of the present network cannot be improved. Despite this, the need for an optimum network with a better spatial and temporal distribution is felt.*

### Keywords

*Geostatistics, Kriging, Network Design, Groundwater, Nitrate, Electrical Conductivity, Mashhad.*

## مقدمه

در حال حاضر ۹۰ درصد نیاز آبی مصرفی شهر مشهد از تعدادی چاه با ظرفیت تولید ۱/۲۰۹ میلیون متر مکعب در سال، ۸ درصد از دو سد طرق و کارده با ظرفیت تولید ۱۹/۷ میلیون متر مکعب در سال و ۲ درصد از یک دهانه چشمه اندرخ با ظرفیت پتولید ۵/۶ میلیون متر مکعب در سال تامین می‌شود [۲۰۱]. از آنجائیکه عمده آب مصرفی شهر از منابع آبهای زیرزمینی تأمین می‌شود، لذا بررسی کیفی این منبع تأمین آب حائز اهمیت فراوانی می‌باشد. اندازه گیری‌های انجام شده تنها در چاه‌های موجود صورت می‌پذیرد و لذا نقطه‌ای می‌باشند. تعمیم نتایج به سایر نقاط فاقد آمار ایجاب می‌کند که شبکه چاهها از تراکم مناسبی برخوردار باشد به طوری که کلیه برآوردها بتوانند با دقت بالایی (خطای برآورد پائین) تعیین شوند.

تهیه و به کارگیری روش های علمی طراحی شبکه یکی از مسائل پیچیده در هیدرولوژی به شمار می‌آید. نمونه‌گیری ساده تصادفی، توابع همبستگی و روشهای رگرسیون غالباً برای طراحی شبکه بکار گرفته می‌شوند. به نظر می‌رسد که قدیمی‌ترین تلاش‌ها مربوط به هرشفیلد [۳] باشد. وی پیشنهاد کرد که میانگین فاصله بین ایستگاه‌ها به نحوی انتخاب شود که منجر به یک ضریب همبستگی ۰/۹ بین آمار ایستگاه‌ها شود. چنین مفهوم رگرسیونی توسط سایر محققین نیز بکار گرفته شده است [۴-۶]. افزون بر چنین روش‌هایی از مفاهیم تئوریکسی و تعمیم یافته‌تری نیز استفاده شده است. در این روش‌ها عمدتاً همبستگی مکانی فرآیند تحت مطالعه مد نظر می‌باشد [۷-۹].

هوگز و لتن مایر [۱۰] این نکته را تاکید کردند که روش کریجینگ از توانایی بالقوه بالاتری نسبت به سایر روش‌های دیگر برای طراحی شبکه آمار برداری در مطالعات هیدرولوژیکی برخوردار است. کسیم و کوتگودا [۱۱] خاطر نشان کردند که واریانس تخمین زده شده عامل مهمی برای تعیین موقعیت باران‌سنج‌ها می‌باشد. نامبردگان تعدادی باران‌سنج را به یک شبکه موجود باران‌سنجی اضافه کردند تا دقت بالاتری در اندازه‌گیری مقدار و سایر خصوصیات باران برای یک واقعه خاص بارندگی قابل حصول باشد. کسیم و کوتگودا با استفاده از اصول کریجینگ [۱۲] نقشه خطا را بر اساس انحراف معیار مقدار بارندگی تخمین زده شده تهیه کردند. گرچه این روش برای یک واقعه بارندگی مفید است، لیکن تغییر واقعه بارندگی منجر به تغییراتی اساسی در نقشه توزیع خطا و واریوگرام می‌شود که نتیجه‌گیری را برای محل مناسب باران‌سنج‌های مورد نیاز دشوار می‌سازد. علاوه بر این، انحراف معیار برای دو مقدار کاملاً متفاوت از برآورد، نتایج کاملاً متفاوتی خواهد داشت (بطور مثال اگر دو واقعه برآورد شده ۲ و ۱۰۰ دارای انحراف معیار یکسان ۲ باشند، واقعه اول به مراتب غیر قابل اطمینان‌تر است در حالیکه واقعه دوم

کاملاً قابل اعتماد خواهد بود). با توجه به این دو دلیل قهرمان و سپاسخواه [۱۳] به جای یک واقعه بارش مشخص، از دسته منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی و به جای معیار انحراف معیار از معیار ضریب تغییرات استفاده کردند و شبکه باران‌سنجی ثبات ایران را مورد ارزیابی قرار دادند و مناطقی را جهت ایستگاه‌های جدید به منظور دستیابی به یک دقت بالاتر پیشنهاد نمودند. به جز پارامتر باران، شبکه تراکم سایر فرآیندهای هیدرولوژیکی نیز توسط روش کریجینگ می‌تواند مورد مطالعه قرار گیرد [۱۴-۱۵]. روش‌های آماری در میان‌یابی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی در سال‌های اخیر به کار گرفته شده‌اند [۱۶-۱۸]. در مرجع [۱۹] این روش به‌طور مشخص در طراحی شبکه نمونه‌برداری و پایش کیفیت آب زیرزمینی در کشور هلند مورد استفاده قرار گرفته است.

هدف از این مطالعه، ارزیابی کفایت شبکه چاه‌های آب شرب شهر مشهد در ردیابی نیترات و هدایت الکتریکی آب با استفاده از کریجینگ می‌باشد. همچنین، محل‌های پیشنهادی چاه‌های جدید به منظور کاهش خطای برآورد معرفی خواهند شد.

## تئوری

یک میان‌یابی بهینه بین آمار اندازه‌گیری شده واقعی می‌تواند بوسیله روش‌های مختلفی از جمله روش کریجینگ، که یک روش سیستماتیک و متکی بر معیارهای آماری است انجام شود. در روش کریجینگ، که در این تحقیق مورد استفاده بوده است، فرض می‌شود که ناحیه تحت مطالعه یک ساختار مشخص ناحیه‌ای دارد که دقت مقادیر برآورد شده را تحت تاثیر قرار می‌دهد. همچنین بهترین برآورد را می‌توان از روی مجموع وزن‌دار از مشاهدات بدست آورد [۱۲]. بنابراین کریجینگ یک روش برای محاسبه بهینه این وزن‌ها می‌باشد. در اینجا برخی از اصول برآورد به روش کریجینگ بیان می‌شود. برای تخمین مجموعه‌ای از مقادیر در محل‌های فاقد وسایل اندازه‌گیری، می‌توان از مقادیر اندازه‌گیری شده در نقاط اطراف با در نظر گرفتن فاصله مکانی تا مکان‌های مورد نظر استفاده کرد. فرض می‌شود که در محدوده مورد مطالعه خصوصیات ایستا بوده و از یک روند مشخصی تبعیت نمی‌کنند. با این وجود، تفاوت‌هایی در ساختار بین یک نقطه و نقاط دیگر وجود خواهد داشت. بعلاوه هر نقطه یک ناحیه‌ای را تحت تاثیر خود دارد. مشاهدات انجام شده در هر ناحیه مقدار برآورد در سایر نقاط آن ناحیه را متأثر می‌سازد. بنابراین محدوده تاثیر و بهترین روش برآورد را باید تعیین کرد. این کار بوسیله مجموعه‌ای از وزن‌ها انجام می‌شود. سیستم کریجینگ در ابتدا بوسیله ماترون [۱۲] پایه‌گذاری شد که امروزه در شاخه‌های مختلفی از علوم بکار گرفته می‌شود [۲۰]. در سیستم کریجینگ برآوردی از مقدار یک متغیر،  $Z^*(x_0)$ ، در یک محل مشخص  $x_0$  و واریانس نظیر آن،  $VAR(Z^*(x_0))$ ، (حداقل خطای برآورد) را می‌توان مطابق زیر محاسبه کرد:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n [\alpha_i Z(x_i)] \quad (1)$$

$$VAR(Z^*(x_0)) = \mu + \sum_{i=1}^n [\alpha_i \gamma_{i0}] \quad (2)$$

که در آن‌ها  $Z(x_i)$  مقدار پارامتر تحت بررسی در محل  $x_i$  و  $\gamma_{i0}$  نیم تغییر نما بین نقاط در موقعیت‌های  $i$  و  $0$  می‌باشد. وزن‌های بهینه  $(\alpha_i)$  و ضریب لاگرانژ  $(\mu)$  با استفاده از جبر ماتریس‌ها بدست می‌آیند [۲۰]. نیم تغییر نما  $\gamma(h)$  معیاری از وابستگی مکانی بوده و جزء مهمی از یک مدل فضایی محسوب می‌شود. نیم تغییر نما را می‌توان با استفاده از رابطه (۳) محاسبه نمود:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} N(h) \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

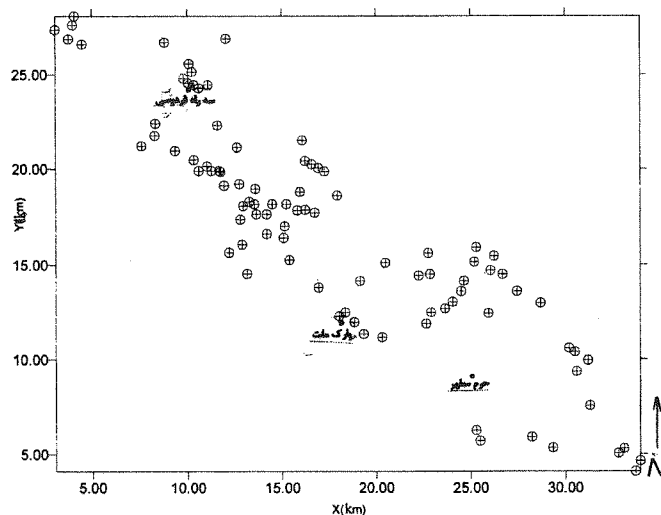
که در آن  $h$  فاصله مکانی،  $N(h)$  تعداد جفت مشاهدات با فاصله مکانی  $h$ ، و  $Z(x_i+h)$  مقدار پارامتر تحت بررسی در موقعیت  $x_i+h$  می‌باشد. نیم تغییر نمایی که به این روش بدست می‌آید تنها مجموعه‌های مرتب شده‌ای از مقادیر منفرد بوده و توأم با خطا می‌باشد. گرچه می‌توان این نقاط را با خطوط و یا منحنی‌هایی به هم وصل نمود ولی شکل حاصل کاملاً نامنظم خواهد بود. با این وجود، عموماً می‌توان شکل‌های مشخصی را بر روی نقاط حاصل برازش داد و معادله ریاضی آن‌ها را نیز تعیین کرد. برخی از این توابع شناخته شده در مراجع موجود است (مثلاً وبستر، [۲۱]؛ کیتانیدیس، [۲۲]). در یک طبقه بندی کلی این مدل‌ها را می‌توان به مدل‌های مطمئن (خطی، کروی، نمایی، هیپربولیک)، مدل‌های ریسکی (دایره‌ای، خطی سقف‌دار) و تودرتو تقسیم بندی کرد. غالباً ضریب همبستگی بالا و انحراف معیار کم مقادیر برآورد شده، معیارهایی برای انتخاب بهترین مدل و سپس انجام فرآیند تخمین به روش کریجینگ تلقی می‌شود. انحراف معیار (جذر VAR در رابطه ۲) شاخصی از عدم اطمینان برای مقادیر برآورد شده می‌باشد و عموماً ترسیمی از این عدم اطمینان را نقشه خطا می‌نامند [۱۱].

انحراف معیار بالا دلیلی بر ناکافی بودن تعداد ایستگاه‌های آماربرداری در تئوری کریجینگ می‌باشد. با این وجود مقدار مطلق انحراف معیار بدون توجه نمودن به مقدار واقعه برآورد شده منجر به استنتاج صحیحی نخواهد شد. در این صورت کمیت ضریب تغییرات که در آن تاثیر نسبی خطا سنجیده می‌شود کارا تر خواهد بود. در این تحقیق، ضریب تغییرات مورد استفاده قرار گرفته است.

## ناحیه تحت مطالعه و آمار و اطلاعات

دشت مشهد با وسعت تقریبی ۵۰۰۰ کیلومتر مربع در حوزه کشف رود با مساحت تقریبی ۱۶۵۰۰ کیلومتر مربع قرار دارد که در آن سالانه در حدود ۲۵۰ میلیون متر مکعب کسری مخزن وجود دارد و در نتیجه از سال ۱۳۴۷ در لیست دشتهای ممنوعه قرار گرفته است. یکی از قسمتهای دشت مشهد، شهر مشهد می‌باشد که به عنوان مرکز استان خراسان در شمال شرقی کشور و در حوزه آبریز کشف رود واقع است. این شهر از نظر وسعت دومین شهر بزرگ ایران است و با دارا بودن جمعیتی بیش از ۲ میلیون نفر به عنوان دومین شهر پرجمعیت کشور شناخته می‌شود [۱].

گستره شهر مشهد و حومه آن در این مطالعه تحت بررسی می‌باشد. چاه‌های حفر شده در این محدوده توسط شرکت آب و فاضلاب مشهد بهره برداری و مدیریت می‌شود. با توجه به کیفیت ثبت آمار و اطلاعات در آرشیو این شرکت، تعداد ۹۲ حلقه چاه عمیق جهت انجام بررسی انتخاب گردید. این چاه‌ها در محدوده‌ای در حدود ۲۷۰ کیلومتر مربع پراکنده‌اند و دارای عمقی بین ۱۶۰ تا ۲۵۰ متر می‌باشند. در شکل ۱ نحوه پراکندگی چاه‌ها نشان داده شده است. مختصات چاه‌ها بوسیله سیستم UTM بیان می‌شود و نقطه‌ای با UTM افقی ۷۱۰۰۰۰ و UTM عمودی ۴۰۱۰۰۰۰ به عنوان مبدا مختصات در نظر گرفته شد تا یک دستگاه مختصات محلی حاصل گردید.



شکل (۱) موقعیت نسبی چاه‌های آب شرب شهر مشهد مورد استفاده در این مقاله.

این بررسی بر روی دو پارامتر نیترات و هدایت الکتریکی آب متمرکز می‌باشد. به این دلیل مقادیر اندازه‌گیری شده آن‌ها در دو سال ۱۳۷۸ و ۱۳۷۹ جمع‌آوری گردید (هر چاه دارای حدود ۶ آمار می‌باشد). از آنجا که بررسی‌های زمین آماری تنها به تحلیل مکانی اطلاعات، و نه تحلیل زمانی آنها، می‌پردازد. بنابراین برای این منظور بایستی از یک محدوده زمانی مشخص استفاده شود. این نکته که اندازه‌گیری‌ها در چاه‌های مختلف در یک زمان واحد انجام نشده است، انتخاب محدوده زمانی را دچار مشکل می‌کند. بنابراین در محدوده‌های مختلف زمانی (فصلی، سالانه و آخرین آمار) مقایسه‌هایی بین مقدار پارامتر در یک دوره زمانی با مقدار همان پارامتر در دوره زمانی دیگر صورت پذیرفت. در این رابطه، مقدار کمیت مربوط به یک چاه در یک بازه زمانی مورد بررسی، از میانگین اطلاعات مختلف مربوط به آن چاه در آن بازه زمانی بدست آمد. به منظور مقایسه اطلاعات در دو بازه زمانی مختلف، مقادیر آن‌ها بر روی دو محور متعامد قرار داده شدند. مشاهدات نشان داد که روند تغییرات نسبتاً یکنواخت است و نقاط ترسیم شده در حوالی خط  $45^\circ$  واقع در صفحه این دو محور متعامد پراکنده می‌باشند. شیب خطوط (ضرایب همسانی) در بررسی‌ها نزدیک به یک بدست آمد که نشان دهنده تغییرات اندک پارامترهای تحت بررسی در طی سال‌های ۱۳۷۸ و ۱۳۷۹ و دوره‌های زمانی متفاوت می‌باشد. جداول ۱ و ۲ نتایج مربوط به هدایت الکتریکی را بترتیب برای دوره‌های زمانی شش ماهه و سه ماهه نشان می‌دهند. در نتیجه آخرین اندازه‌گیری در هر چاه ملاک عمل برای تحلیل فضایی اطلاعات در نظر گرفته شد. توضیح کامل تجزیه و تحلیل زمانی انجام شده خارج از موضوع این مقاله است و در مرجع [۲۳] یافت می‌شود.

جدول (۱) ضرایب همسانی تغییرات زمانی شش ماهه و سالانه پارامترهای کیفی آب در طی سالهای ۷۸ و ۷۹.

دوره زمانی					
دوره زمانی	نیمه اول ۱۳۷۸	نیمه دوم ۱۳۷۸	سال ۱۳۷۸	نیمه اول ۱۳۷۹	آخرین آمار ۱۳۷۹
نیمه دوم ۱۳۷۸	۰/۹۹۴	۱	-	۰/۹۸۴	-
نیمه اول ۱۳۷۹	-	۱/۰۱۶	-	۱	-
نیمه دوم ۱۳۷۹	-	-	-	۰/۹۸۶	-
سال ۱۳۷۹	-	-	۱/۰۲۳	-	۰/۹۷۷

جدول (۲) ضرایب همسانی تغییرات زمانی، فصلی پارامترهای کیفی آب در طی سالهای ۷۸ و ۷۹.

دوره زمانی	بهار ۷۸	تابستان ۷۸	پائیز ۷۸	زمستان ۷۸	بهار ۷۹	تابستان ۷۹	پائیز ۷۹
تابستان ۷۸	۰/۹۸	۱	۰/۹۷۶	۱/۰۲۵	-	-	-
پائیز ۷۸	۱/۰۰۴	۱/۰۲۴	۱	۱/۰۴۹	-	-	-
زمستان ۷۸	۰/۹۵۶	۰/۹۷۵	۰/۹۵۱	۱	-	-	-
بهار ۷۹	۱/۰۲۳	-	-	-	۱	۱/۰۱۴	۱/۰۲۴
تابستان ۷۹	-	-	-	-	۰/۹۸۶	۱	۱/۰۹۹
پائیز ۷۹	-	-	-	-	۰/۹۷۶	۰/۹۹۱	۱
زمستان ۷۹	-	-	-	۱/۰۱	۰/۹۴۷	۰/۹۶۶	۰/۹۷۶

## بحث و نتایج

### ارزیابی شبکه و ارائه بهترین مناطق حفاری

بهترین نقاط حفاری جدید برای کاستن خطای برآورد می‌تواند با استفاده از مقادیر خطای محاسبه شده در روش کریجینگ و با اعمال معیارهای مختلف خطا صورت پذیرد. این معیارهای مختلف شامل حداقل کردن مجموع مربعات انحرافات، حداقل کردن مجموع قدرمطلق انحرافات و یا حداقل نمودن حداکثر انحراف می‌باشد که برای پیشنهاد دادن نقاط

نمونه برداری جدید به منظور کاستن خطای برآورد در یک شبکه موجود اعمال می‌شود. اعمال دو معیار اول نیاز به تدوین یک مدل بهینه‌یابی وسیع دارد. در این تحقیق، از معیار آخر، یعنی ردیابی نقطه‌ای با حداکثر ضریب تغییرات، استفاده شده است. برای این منظور نقطه‌ای که بالاترین ضریب تغییرات را دارا باشد مشخص می‌شود. در مرحله بعد چاه فرضی در این نقطه به سیستم چاه‌های موجود اضافه شده و کلیه مراحل کار با تعداد نقاط بیشتر تکرار می‌شود و مجدداً تحلیل خطا صورت می‌پذیرد. این چاه اضافه شده فرضی است و لذا فاقد مقدار اندازه‌گیری شده واقعی می‌باشد. با این وجود مقدار برآورد شده در این محل که توسط کریجینگ صورت پذیرفته است، بهترین برآورد نااریب می‌باشد و می‌تواند پایه‌ای برای ادامه مطالعات تلقی شود. این سیکل تا رسیدن به ضریب تغییراتی که به اندازه کافی کم باشد می‌تواند تکرار شود.

همان طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، کلیه چاه‌های مورد بررسی در محدوده‌های خاص و در یک راستای شمال غربی - جنوب شرقی پراکنده شده‌اند. دلیل چنین گسترشی وجود رودخانه کشف رود در شمال و نیز وجود رشته کوه‌های کوهسنگی و بینالود در قسمت جنوبی می‌تواند باشد. به همین دلیل لازم است محل‌های جدید پیشنهاد حفاری به منظور کاهش خطای تخمین‌ها نیز در محدوده پراکندگی چاه‌های موجود قرار داشته باشند. بدین منظور منطقه مورد بررسی برای تعیین محل‌های جدید حفاری بین دو خط موازی به معادلات:  $Y=37.0-0.8X$  و  $Y=24.8-0.8X$  محدود شد و خطای تخمین‌ها تنها در نقاطی که در این محدوده قرار دارند مورد نظر قرار گرفت. مقادیر  $X$  و  $Y$  در این روابط بترتیب فاصله مکانی بر روی محور افقی و عمودی (در راستای شمال) می‌باشند.

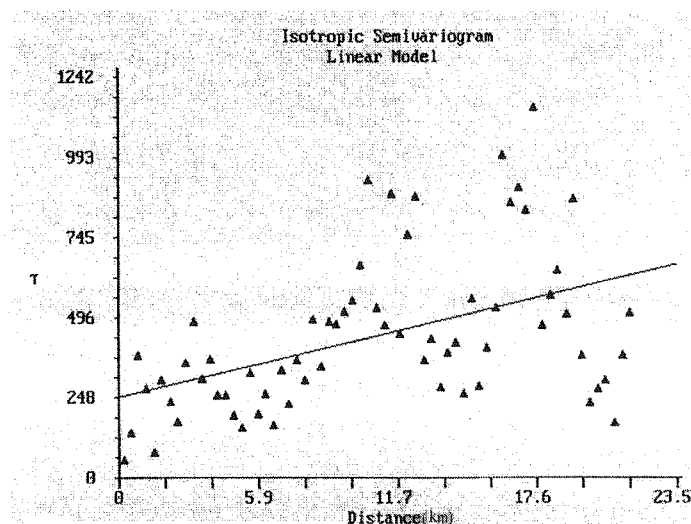
## نیترات

مدل خطی (شکل ۲) برای نیم تغییر نمای نیترات بدست آمد. کلیه آزمون‌های آماری [۲۲] در این مدل با موفقیت انجام شدند. این مدل از جمله مدل‌های دارای روند است. حذف روند با انتخاب ساده‌ترین رویه (مدل درجه اول خطی، معادله ۴) میسر نگردید ولی رویه درجه دوم (معادله ۵) منجر به حذف روند از اطلاعات گردید. شکل (۳) مدل نیم تغییر نمای را به عنوان مدل بهینه نشان می‌دهد که بر باقیمانده‌های اطلاعات پس از حذف روند برازش داده شده است. رابطه نیم تغییر نمای به دست آمده در رابطه ۶ ارائه شده است.

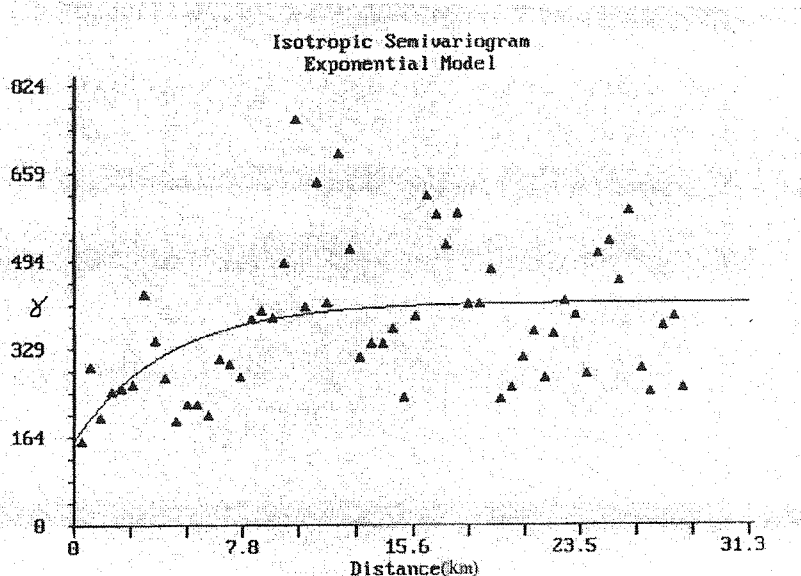
$$\hat{Z} = 13.354 + 0.789X - 0.21Y \quad (4)$$

$$\hat{Z} = 18.38 + 1.759X + 2.712Y - 0.01X^2 - 0.069Y^2 - 0.034XY \quad (5)$$

$$\gamma(h) = 164 + 267(1 - e^{-0.645h}) \quad (6)$$

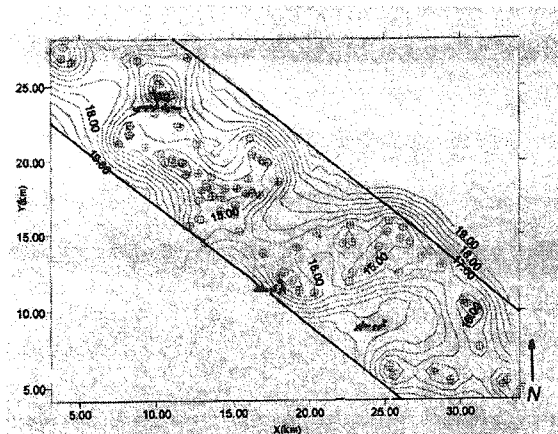


شکل (۲) نیم تغییر نمای برازش شده بر داده‌های اولیه نیترات.

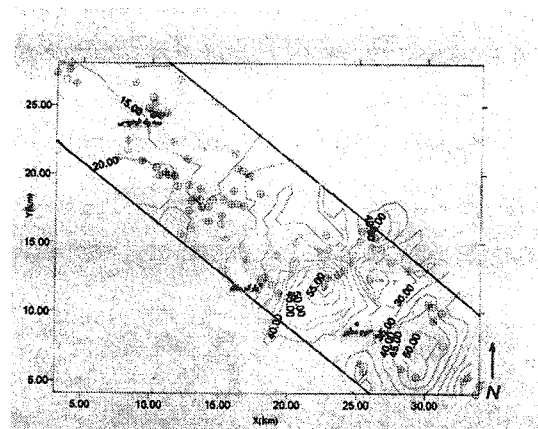


شکل (۳) نیم تغییر نمای برازش داده شده بر باقیمانده ها پس از برازش رویه درجه دوم برداده های نیترا.

گرچه پراکندگی نقاط حول معادله برازش یافته به نظر زیاد می آید ولی چنین پراکندگی در مطالعات منابع آب قابل قبول می باشد [۱۱، ۱۳ و ۱۹]. مدل فوق در طی یک فرآیند کالیبراسیون بهینه سازی صورت پذیرفت و منجر به انتخاب فاصله فعال ۸۰ درصد، گام فعال ۰/۵۴ کیلومتر و تعداد نقاط همسایگی ۸ گردید [۲۳]. این پارامترها، پارامترهای کنترلی در انتخاب تعداد نقاط در ترسیم نیم تغییر نما و نقاط مورد استفاده به منظور تخمین در یک نقطه در روش کریجینگ می باشند. در نرم افزار GS+، که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است [۲۴]، پارامترهای مذکور در یک فرآیند محاسباتی بهینه شدند [۲۳]. شکل (۴) چگونگی تغییرات نیترا و خطای برآورد آن را نشان می دهد. گرچه در مناطق شمال غربی میزان نیترا کم و بین ۱۵ تا ۲۰ میلی گرم در لیتر است، ولی در مناطق جنوب شرقی میزان آن از حد مجاز ۵۰ میلی گرم در لیتر (بر اساس استاندارد اتحادیه اروپا؛ [۲۵]) نیز فراتر رفته است. شکل (۴) همچنین حکایت از این دارد که خطای برآورد برای کل منطقه تقریباً یکسان و در حدود ۱۵ میلی گرم در لیتر است. بنابراین نقطای که میزان برآورد نیترا پائینی دارند از ضریب تغییرات بالاتری برخوردار خواهند بود.



(ب)

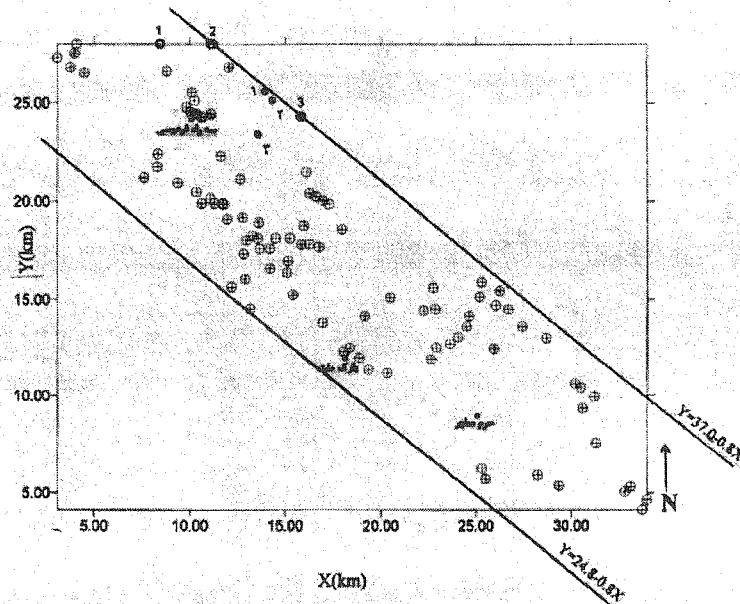


(الف)

شکل (۴) تغییرات مکانی نیترا (الف) و خطای برآورد آن (ب) بر حسب میلی گرم در لیتر در محدوده تحت بررسی.

موقعیت بهترین سه نقطه اولیه چاه به منظور کاهش خطای تخمین ها در شکل (۵) ارائه شده است. همان طور که قبلاً

توضیح داده شد انتخاب این نقاط بر مبنای ضریب تغییرات در محدوده مورد مطالعه می‌باشد. بایستی توجه شود که لزوماً نقطه‌ای با حداکثر ضریب تغییرات بر نقطه‌ای با حداکثر خطای برآورد منطبق نخواهد بود. ولی همان‌طور که قبلاً عنوان شد بر نقطه‌ای با حداکثر خطای برآورد ارجح است. هر سه نقطه پیشنهادی در مرزهای محدوده چاه‌های موجود است که نشان‌دهنده این نکته در تئوری کریجینگ می‌باشد که با فاصله گرفتن از محل‌های موجود اندازه‌گیری شده، انحراف معیار برآوردها افزایش می‌یابد. بنابراین بطور قطع در مناطق دورتر از این مرزها مقادیر تخمین بالاتری وجود خواهد داشت. با وجود این جدول (۳) مشخص می‌سازد که درصد کاهش خطای تخمین برای این سه نقطه بسیار ناچیز است و بنابراین نمی‌تواند توجیه‌کننده مخارج بالای حفاری چاه‌ها باشد.



شکل (۵) وضعیت قرارگیری چاه‌های نمونه‌برداری پیشنهادی در مورد نیترا (دوایر توخالی) و هدایت الکتریکی (دوایر توپر).

جدول (۳) درصد کاهش در حداکثر خطای برآورد و حداکثر ضریب تغییرات پس از پیشنهاد اضافه کردن چاه‌های جدید.

شماره چاه پیشنهادی	X (km)	Y (km)	درصد کاهش در حداکثر ضریب تغییرات	درصد کاهش در حداکثر خطای برآورد
نیترا				
۱	۸/۶۲۵	۲۸/۱	۲/۲۲	۱/۰۱
۲	۱۵/۱۲۵	۲۴/۹	۸/۹۸	۱/۶۶
۳	۱۱/۱۲۵	۲۸/۱	۱۴/۶۱	۲/۶۹
هدایت الکتریکی				
۱	۱۳/۸۲۵	۲۵/۹	۱۰/۴۱	۰/۷۳
۲	۱۴/۲۲۵	۲۵/۶	۱۲/۷۱	۱/۰۰
۳	۱۳/۴۲۵	۲۳/۸	۲۰/۲۹	۱/۷۸

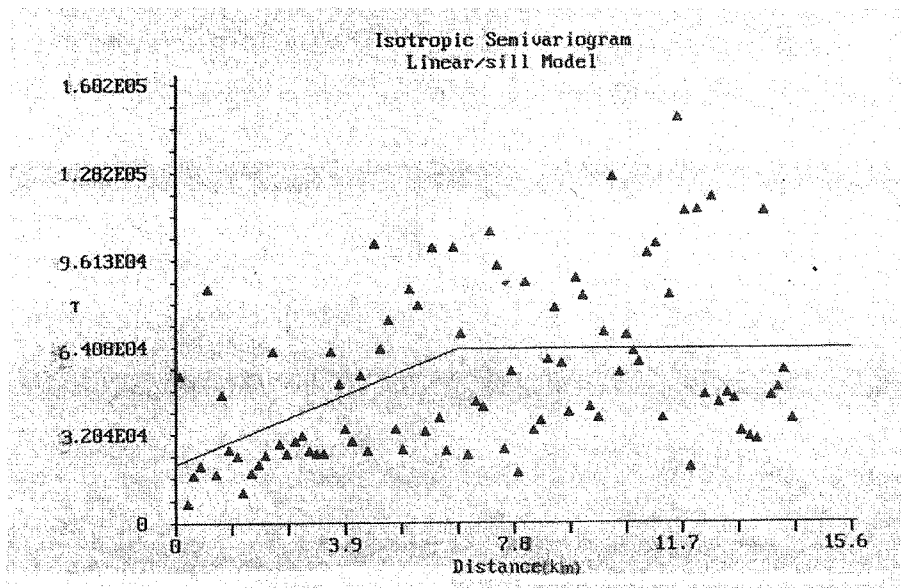
## هدایت الکتریکی

نیم تغییر نمای خطی سقف‌دار بهترین مدل نیم تغییر نمایی بدست آمد که بتواند آزمون‌های آماری [۲۲] را با موفقیت بگذراند. این نیم تغییر نما (شکل ۶) بر خلاف نیترا (شکل ۲) فاقد روند است (معادله ۷)، با این وجود پراکندگی نقاط حول مدل مناسب در همان محدوده مدل‌های برازش داده شده برای نیترا (شکل‌های ۲ و ۳) می‌باشد. انتخاب این مدل بهینه

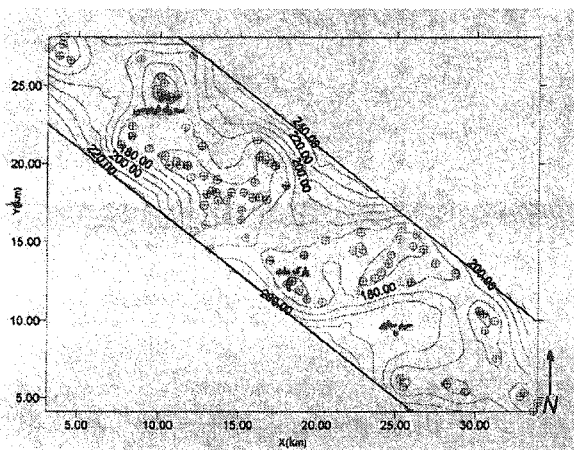


پس از طی یک فرآیند کالیبراسیون و انتخاب پارامترهای فاصله فعال ۴۰ درصد، گام فعال ۰/۱۸ کیلومتر و تعداد نقاط همسایگی ۱۰ [۲۳] بدست آمد. نحوه تغییرات هدایت الکتریکی و خطای برآورد آن در شکل (۷) آورده شده است. هدایت الکتریکی آب در محدوده وسیعی از مناطق مناسب (کمتر از ۹۰۰ دسی‌زیمنس برمتر) است و تنها ناحیه کوچکی در جنوب شرقی شهر از شوری بالایی (بیشتر از ۱۲۵۰ دسی‌زیمنس برمتر - حداکثر قابل قبول هدایت الکتریکی در آب آشامیدنی بر اساس استاندارد اتحادیه اروپا؛ [۲۵]) برخوردار است. خطا در تخمین مقدار هدایت الکتریکی نیز همچون نیترا برای کل محدوده چاه‌ها تقریباً یکسان بوده و در حدود ۱۸۰ تا ۲۰۰ دسی‌زیمنس برمتر است.

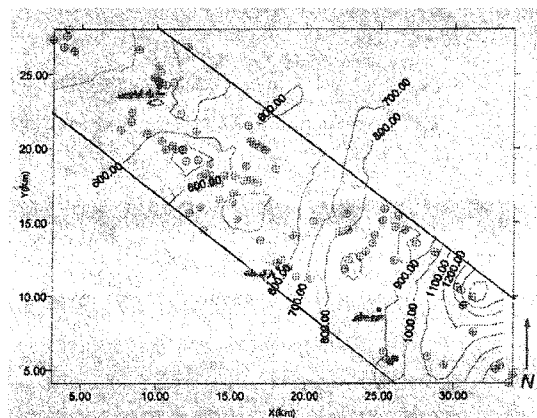
$$\gamma(h) = 21230 + 5663h \quad h \leq 6.45 \quad (7)$$



شکل (۶) نیم تغییر نمای برازش داده شده بر داده‌های هدایت الکتریکی.



(ب)



(الف)

شکل (۷) تغییرات مکانی هدایت الکتریکی (الف) و خطای برآورد آن (ب) برحسب دسی‌زیمنس بر متر در محدوده تحت بررسی.

موقعیت تقریبی سه مکان پیشنهادی حفر چاه به جهت کاهش خطاهای تخمین در شکل (۵) نشان داده شده است. بجز محل پیشنهادی شماره ۳، دو محل دیگر تقریباً بر روی محیط ناحیه محصور شده بین دو خط موازی محدود کننده ناحیه چاه‌ها قرار دارند. با وجود این، محل شماره ۳ بخوبی توانسته است در محل مناسبی از نقطه نظر فاصله بین چاه‌های مجاور قرار گیرد. درصد کاهش حداکثر خطای تخمین ناشی از اضافه کردن چاه(های) پیشنهادی در جدول ۱ آورده شده است. مشابه حالت بررسی شده در مورد نیترا این کاهش‌ها محسوس نمی‌باشد.

## نتیجه گیری

شیوه تجزیه و تحلیل ارایه شده و استفاده جهت دار از روش سیستماتیک کریجینگ در ارزیابی عملکرد مکانی شبکه چاه‌های موجود و اعمال این روش‌ها بر اطلاعات میدانی موجود در داخل کشور از نتایج مشخص این تحقیق می‌باشد. نقشه‌های توزیع خطا برای برآورد نیترا و هدایت الکتریکی مشخص می‌سازند که علیرغم بالا بودن نسبی خطای مربوط به هر یک از پارامترهای کیفی، در گستره مکانی تحت مطالعه، این خطاها از توزیع نسبتاً یکسانی برخوردار می‌باشند. بنابراین می‌توان استنتاج نمود که توزیع مکانی شبکه فعلی چاه‌ها، گرچه بر یک پایه اصولی طراحی شبکه پایه گذاری نشده است، به نحوی است که حتی پس از اضافه کردن سه چاه مجازی کاهش بسیار ناچیز در حداکثر خطای تخمین (۲/۶۹ و ۱/۷۸ درصد) بترتیب برای نیترا و هدایت الکتریکی) خواهد داشت. لذا عملکرد شبکه فعلی با توجه به نوع اطلاعات در دسترس قابل تغییر نمی‌باشد. گرچه مقادیر پارامترهای کیفی آب در مجله‌های پیشنهادی چاه‌ها که بر مبنای روش کریجینگ تخمین زده شده‌اند بهترین برآورد می‌باشند، لکن مقادیر واقعی نبوده و پس از احداث چاه‌ها بایستی ارزیابی مجدد صورت پذیرد. چنین کاهش‌ی در خطای برآورد به احتمال قوی هزینه بالای احداث و تجهیز چاه (های) جدید را توجیه نمی‌کند. بر این نکته تاکید می‌گردد که توزیع مکانی (سطحی و عمقی) و آمارگیری زمانی از این چاه‌ها بر مبنای اصول طراحی شبکه نمونه برداری و اندازه‌گیری پایدریزی نشده است که این مسئله خود موجب بروز انحراف معیار زیاد در تخمین‌ها گردیده است. لذا، طراحی شبکه‌های اندازه‌گیری موثر و بهینه از پارامترهای کمی و کیفی آب زیرزمینی در این منطقه و سایر مناطق کشور، امری است که باید مورد پی‌گیری جدی قرار گیرد.

## سپاسگزاری

هزینه‌های این تحقیق توسط شرکت آب و فاضلاب مشهد طی قرارداد شماره ۱۱۶۳/۱۱۱ مورخ ۱۳۸۰/۲/۱۵ منعقد شده با دانشگاه فردوسی مشهد تامین شده است که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

## فهرست علائم انگلیسی

$N(h)$ : تعداد جفت مشاهدات با فاصله مکانی $h$	$\alpha_i$ : وزن بهینه برای نقطه $i$ ام در سیستم معادلات کریجینگ.
$VAR(\cdot)$ : واریانس برآوردت خمین،	$\gamma_{i0}$ : نیم تغییر نما (سمی واریوگرام) بین دو نقطه با موقعیت قرارگیری $i$ و $0$ و
$X$ : مختصات در محور افقی (شرقی - غربی)	$\mu$ : ضریب لاگرانژ در سیستم معادلات کریجینگ.
$Y$ : مختصات در محور عمودی (شمالی - جنوبی)	
$Z(\cdot)$ : مقدار پارامتر اندازه‌گیری شده در نقطه مشخص	
$Z^*(X_0)$ : مقدار متغیر برآورد شده در مکان مشخص $X_0$ و	
$\hat{Z}$ : مقدار برآورد شده پارامتر از معادله رویه برازش داده شده برای حذف روند.	

## مراجع

- [۱] ولایتی، ۱۳۷۸. پیامدهای ناشی از اضافه برداشت از آبخان‌های زیرزمینی. مجله دانشکده ادبیات و علوم انسانی دانشگاه فردوسی مشهد، شماره اول و دوم، صفحات ۱۰۷-۱۲۴، بهار و تابستان ۱۳۷۸.
- [۲] بی نام، ۱۳۷۹. گزارش عملکرد آب و فاضلاب مشهد، شرکت آب و فاضلاب مشهد، مشهد.
- [3] D.M. Hershfield, On the spacing of raingages. IASH Publ. 67, Symp. Design of Hydrol. Networks: 72-79 (1965).
- [4] P.S. Eagleson, Optimum density of rainfall networks. Water Resour. Res., 3(4): 1021-1034 (1967).
- [5] P.T. Stol, The relative efficiency of the density of raingage networks. J. Hydrol., 15: 193-208 (1972).
- [6] V.L. Gupta, Hydrologic network design by modified Langbein method. In: V.P. Singh (ed.), Modeling components of hydrologic cycle, Proceedings of the International Symposium on Rainfall- Runoff Modeling, May 18-21, Mississippi State Univ., Miss., USA: 51-70 (1981).
- [7] I. Rodriguez-Iturbe and J.M. Mejia, The design of rainfall networks in time and space. Water Resour. Res.,

- 10(4): 713-728 (1974).
- [8] R.L. Bras and I. Rodriguez-Iturbe, Network design for the estimation of areal mean rainfall events. *Water Resour. Res.*, 12 (6): 1185-1195 (1976).
- [9] R.L. Bras and R. Colon, Time averaged areal mean of precipitation: Estimation and network design. *Water Resour. Res.*, 14(5): 8878-8888 (1978).
- [10] J.P. Hughes and D.P. Lettenmaier, Data requirements for kriging: Estimation and network design. *Water Resour. Res.*, 17(6): 1641-1650 (1981).
- [11] A.H.M. Kassim and N.T. Kottegoda, Rainfall network design through comparative Kriging. *Hydrol. Sci. J.*, 36(3): 223-240 (1991).
- [12] G. Matheron, The theory of regionalized variables and its applications. *Ecol Des Mines Fontainebleau, France* (1971).
- [13] B. Ghahraman and A.R. Sepaskhah, Autographic rain-gage network design for Iran by Kriging. *Iran. J. Sci. Tech.*, 25(B4): 653-660 (2001).
- [14] M. Ashraf, J.C. Loftis and K.G. Hubbard, Application of geostatistics to evaluate partial weather station network. *Agric. Forest Meteorol.*, 84: 255-271 (1997).
- [15] T.S. Virdee and N.T. Kottegoda, A brief review of Kriging and its applications to optimal interpolation and observation well selection. *Hydrol. Sci. J.*, 29(4): 367-387 (1984).
- [16] P.K. Kitanidis and S. Kuo-Fen, Geostatistical interpolation of chemical concentration. *Advances in Water Resour.*, 19(6):369-378 (1996).
- [17] M.F. Snodgrass and P.K. Kitanidis, A geostatistical approach to contaminant source identification. *Water Resour. Res.*, 33(4):537-546 (1997).
- [18] R.A. Carlson and J.L. Osiensky, Geostatistical analysis and simulation of nonpoint source groundwater nitrate contamination: A case study. *Environmental Geosciences*, 5(4):177-186 (1998).
- [19] E.J. Pebesma and J.W. de Kwaadsteniet, Mapping groundwater quality in the Netherlands. *J. Hydrol.*, 200: 364-386 (1997).
- [20] A.W. Warrick, D.E. Myers and D.R. Nielsen, Geostatistical methods applied to soil science. In: A. Klute (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods*, Agronomy Monograph No. 9, Soil Soc. of Amer., Madison, WI, USA, 53-82 (1986).
- [21] R. Webster, Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Advances in Soil Science*, 3: 1-70 (1982).
- [22] P.K. Kitanidis, Geostatistics. In: D.R. Maidment (ed.), *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill Book Co., Chapter 20 (1993).
- [23] عسگری، ح.م.، ۱۳۸۰. تهیه نقشه های کاربردی از پارامترهای کیفی آب زیرزمینی شهر مشهد با استفاده از علم زمین آمار. پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته عمران گرایش آب، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، ۲۰۸ ص.
- [24] Gamma Design Software, GS+, *Geostatistics for the Agronomic and Biological Sciences*, Version 1.1, 65p.
- [25] عودی، ق.، ۱۳۷۳. کیفیت آب آشامیدنی. انتشارات محقق، ۱۵۰ ص.