

## پهنه‌بندی کیفی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های زمین آمار و GIS (مطالعه موردی حوضه آبخیز سلیمان‌شاه)

انسیه مرآتی\*<sup>۱</sup>، عبدالله طاهری تیزرو<sup>۲</sup>، نصرالدین پارسا<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۷/۲۴

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۱۵

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

<sup>۳</sup> دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، همدان، ایران

\* مسئول مکاتبات، آدرس پست الکترونیکی: enciehmerati@yahoo.com

### چکیده

در بسیاری از مناطق جهان مخصوصاً مناطق خشکی مانند ایران، آب زیرزمینی به‌عنوان منبع مهمی برای رفع نیاز-های شرب و کشاورزی محسوب می‌شود. فعالیت‌های کشاورزی و استفاده بیش از اندازه از کودهای شیمیایی از عوامل مهم در کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی است. این پژوهش با هدف بررسی پراکنش کیفیت آب‌های زیرزمینی در حوضه آبخیز سلیمان‌شاه در استان کرمانشاه و تهیه نقشه آلودگی آب‌های زیرزمینی در اراضی تحت کشاورزی با استفاده از روش زمین آمار صورت گرفت. لذا به‌منظور پیش‌بینی پراکنش مکانی پارامترهای کل مواد جامد محلول (TDS)، نسیت جذب سدیم (SAR)، کلر و نیترات آب‌های زیرزمینی از ۶۰ چاه موجود در محدوده نمونه‌برداری شده، جهت درونیابی از روش‌های کریجینگ و IDW و به‌منظور انتخاب مدل مناسب از شاخص RSS استفاده گردید، سپس با استفاده از تکنیک ارزشیابی متقابل و روش‌های ارزیابی خطا، نظیر RMSE و ME مناسب‌ترین روش درونیابی انتخاب شد. نتایج نشان داد که برای پهنه‌بندی پارامترهای مذکور روش کریجینگ معمولی-نمایی بر سایر روش‌ها ارجحیت دارد. در نهایت پس از انتخاب مدل مناسب جهت درونیابی، نقشه پراکنش پارامترهای مورد بررسی در محیط ArcGIS10 تهیه گردید.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای کیفی، آب زیرزمینی، درونیابی، GIS

## Qualitative Zoning of Groundwater Resources Using Geostatistical and GIS Methods (Case Study: Soleymanshah Watershed)

E Merati<sup>1\*</sup>, A Taheri Tizro<sup>2</sup>, N Parsafar<sup>3</sup>

Received: 16 October 2015 Accepted: 04 January 2017

<sup>1</sup>- Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

<sup>2</sup>- Assoc. Prof., Department of Water Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

<sup>3</sup>- Young Researchers & Elite Club, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

\*Corresponding Author, Email: enciehmerati@yahoo.com

### Abstract

In many regions especially dry areas such as Iran, groundwater resources are the main sources to provide the needed drinking and agricultural water. Agricultural activities and excessive use of the chemical pesticides are the important sources which decrease the groundwater quality. Therefore, in this research, using Geostatistical methods including Kriging and weighted Inverse Distance the spatial distribution of TDS, SAR, chloride and nitrate amounts of groundwater were evaluated in the Kermanshah- Soleymanshah watershed. To this regard, Parameters values of groundwater of 60 wells in watershed were sampled. To analyze the spatial distribution of the groundwater quality the Geostatistical software ArcGIS version 10 was used. The performance criteria for evaluating the used methods were Mean Error (ME) and Root Mean Square Error (RMSE) along with the Cross Validation method. RSS index was used to select the appropriate model. The results showed that the ordinary Kriging was the best method to estimate the qualitative parameters of the groundwater. Finally, the map of the spatial distribution parameter's amounts was provided based on the best method

**Key words:** GIS, Groundwater, Interpolation, Quality Parameters

### مقدمه

تخریب سایر منابع چه به صورت مستقیم و چه به صورت غیرمستقیم است. به منظور حفظ کیفیت آب‌های زیرزمینی اطلاع از پراکنش مکانی و زمانی فاکتورهای کیفی آنها حائز اهمیت است. در این راستا روش‌های زمین آماری یکی از روش‌های پیشرفته برای پهنه‌بندی کیفیت آب‌های زیرزمینی است (خزاعی و همکاران ۱۳۹۰). با پهنه‌بندی کیفی روند تغییرات کیفیت آب زیرزمینی در هر زمان، مکان و شرایط خاص مشخص می‌گردد، می‌توان با حذف ایستگاه‌های دارای وضعیت کیفی مشابه در وقت و هزینه صرفه‌جویی نمود و در مقاطعی که شرایط کیفی متنوع و یا بحرانی است، ایستگاه‌های جدید ایجاد نمود (ترابی پت‌کله ۱۳۸۸).

روش‌های مختلفی برای تخمین متغیرهای مکانی یک منطقه وجود دارد که در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان

در سال‌های اخیر، به علت مواجهه جهانی با کمبود منابع آبی، مطالعه کیفیت آب‌های زیرزمینی به عنوان مهمترین منبع آب شیرین بسیاری از تحقیقات هیدرولوژیکی را به خود اختصاص داده است. آلودگی‌های این منابع علاوه بر منشأ فعالیت‌های انسانی می‌تواند منشأ طبیعی نیز داشته باشد. آب‌های زیرزمینی از منابع مهم بهره‌برداری در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشند. لذا به منظور حفظ کیفیت آب‌های زیرزمینی اطلاع از پراکنش مکانی و زمانی آنها حائز اهمیت می‌باشد. امروزه به‌طور وسیعی از روش‌های مختلف زمین آماری برای پیش‌بینی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی استفاده می‌شود. تغییر در کیفیت آب‌های زیرزمینی که معمولاً بر اثر مدیریت غلط استحصال آب زیرزمینی رخ می‌دهد مقدمه‌ای بر

در این زمینه مطالعات مختلفی صورت گرفته است که از جمله فتانی و همکاران (۲۰۰۸) در مطالعه کیفیت آب زیرزمینی دشت‌های کشاورزی مراکش از نظر اندازه نترات آمونیوم و آلودگی‌های باکترولوژیکی از روش کریجینگ معمولی برای مطالعه و پهنه‌بندی نقشه کیفی آب‌های زیرزمینی استفاده نمودند. نتایج آنها نشان‌دهنده تغییرات معنی‌دار در مقایسه با مطالعات قبلی بود. خزاعی و همکاران (۱۳۹۰)، پهنه‌بندی آلودگی نترات در آب‌های زیرزمینی استان فارس با استفاده از روش زمین آمار رادر منطقه سیاح دارنگون با استفاده از سه روش کریجینگ، معکوس فاصله و کوکریجینگ انجام داده و از کریجینگ شاخص برای تهیه نقشه احتمال آلودگی نترات استفاده نمودند. رضایی و همکاران (۱۳۸۹)، تغییرات مکانی برخی شاخص‌های کیفی آب‌های زیرزمینی استان گیلان را با استفاده از روش‌های کریجینگ و معکوس فاصله ارزیابی نمودند که پهنه‌بندی خواص کیفی نشان داد میزان هدایت الکتریکی آب‌های زیرزمینی در بیشتر مناطق استان پایین است. معروفی و همکاران (۱۳۸۸) روش‌های زمین آمار را جهت تخمین هدایت الکتریکی و  $PH$  زه‌آب‌های آبراه‌ای دشت بهار - همدان بکار بردند که روش‌های چندجمله‌ای موضعی و فاصله معکوس به-ترتیب بهترین الگو برای تخمین هدایت الکتریکی و  $pH$  زه‌آب‌ها و روش توابع پایه شعاعی به‌عنوان نامناسب‌ترین الگو در تخمین هدایت الکتریکی و  $pH$  تعیین گردیدند. تقی زاده مهرجردی و همکاران (۱۳۸۷) روش‌های درون یابی مکانی را جهت تعیین تغییرات مکانی ویژگی‌های کیفی آب‌های زیرزمینی دشت رفسنجان بررسی نموده و با استفاده از روش کوکریجینگ به عنوان بهترین روش درون‌یابی، نقشه‌های پهنه‌بندی ویژگی‌های آب زیرزمینی را در محیط GIS تهیه نمودند. زهتابیان و همکاران (۱۳۸۶) ویژگی‌های کیفی آب زیرزمینی در حوضه آبخیز گرمسار واقع در استان سمنان را با استفاده از روش‌های درون‌یابی زمین آمار

آنها را به روش‌های زمین آماری<sup>۱</sup> و روش‌های کلاسیک تقسیم کرد. روش‌های کلاسیک، روش‌هایی هستند که از آمار کلاسیک برای تخمین استفاده می‌کنند. در صورتی که در روش‌های زمین آماری، تخمین بر اساس ساختار فضایی موجود در محیط موردنظر صورت می‌گیرد. زمین‌آمار به عنوان شاخه‌ای از آمار کاربردی شامل مجموعه مطالعاتی است که به بررسی تغییرات یک پدیده در زمان و مکان می‌پردازد و قادر به مدل‌سازی آن پدیده به صورت قطعی یا غیرقطعی زمانی و مکانی می‌باشد. از جمله ویژگی‌های این علم استفاده از متغیرهای منطقه‌ای اعم از تصادفی یا قطعی می‌باشد. متغیرهای منطقه‌ای متغیرهایی هستند که دارای پیوستگی مکانی بوده و نشان‌دهنده پدیده‌های دارای توزیع جغرافیایی می‌باشند، لیکن امکان نمونه‌برداری از همه نقاط در محدوده مورد مطالعه وجود ندارد و مقادیر مجهول با استفاده از اطلاعات مربوط به مناطق مشخص و نمونه‌برداری شده تخمین زده می‌شود (حسنی پاک ۱۳۸۶). سیستم اطلاعات جغرافیایی و زمین آمار از قابلیت بالایی برای بررسی توزیع مکانی و پهنه‌بندی آلاینده‌ها و ارزیابی منشأ و منبع آلودگی آب‌های زیرزمینی برخوردار هستند. روش‌های زمین آماری کارایی قابل ملاحظه‌ای برای تخمین نقاط نامشخص دارند. استفاده از ابزار تخمین‌گر می‌تواند به منزله سامانه پشتیبان تصمیم‌گیری و به‌عنوان حلقه‌ای از چرخه ارزیابی اثرات زیست محیطی باشد و کمک مؤثری به مدیران برای تصمیم‌گیری نماید. استفاده از نقشه‌های همتراز آلودگی در مباحث مدیریتی حوضه، مدیران و تصمیم‌گیران در بخش‌های مختلف می‌توانند شناخت بهتری نسبت به وقوع اثرات استفاده گسترده از نهاده‌های کشاورزی داشته باشند.

<sup>۱</sup>- Geostatistical

استان کرمانشاه و تهیه نقشه آلودگی آب‌های زیرزمینی در اراضی تحت کشاورزی می‌باشد. در نهایت مناسب‌ترین روش زمین آماری تعیین و نقشه پهنه‌بندی کیفی محدوده مورد مطالعه تهیه گردید.

### مواد و روش‌ها

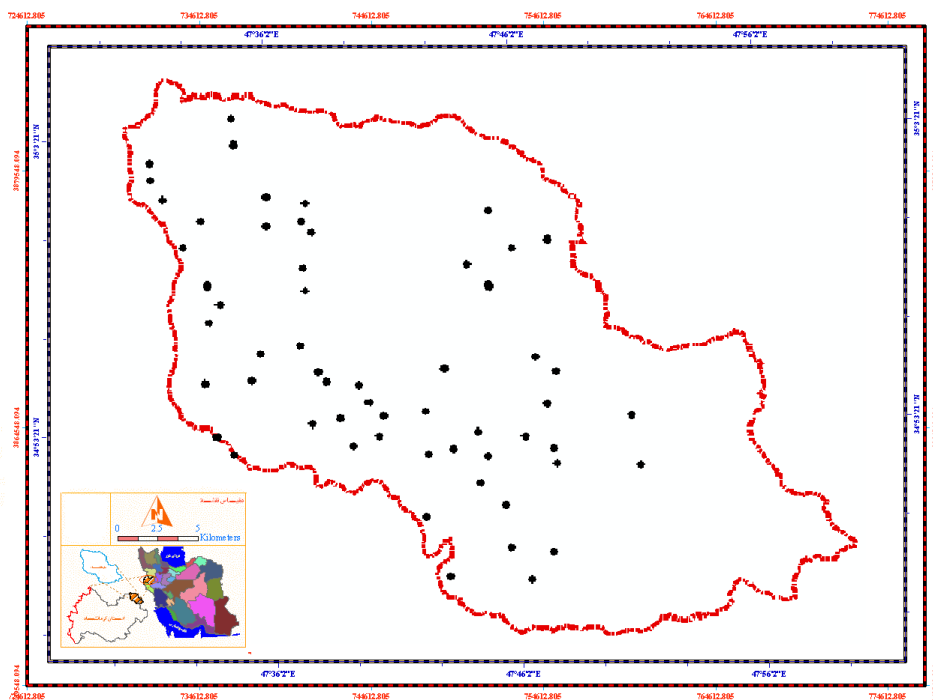
#### حوضه سلیمان‌شاه

حوضه سلیمان‌شاه در شمال شرق استان کرمانشاه قرار داشته و حدود  $\frac{1}{2}$  مساحت حوضه گاوهر رود را شامل می‌گردد. این حوضه در محدوده  $40^{\circ} 20' 40''$  تا  $45^{\circ} 32' 08''$  عرض شمالی گسترده شده‌است. مساحت کل حوضه بالغ بر ۸۳۰ کیلومتر مربع می‌باشد. برای مطالعه این حوضه از نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و برای کنترل عملیات از عکس‌های هوایی ۱:۲۰۰۰۰ و تصاویر ماهواره لندست استفاده شده‌است که موقعیت محدوده و چاه‌های مورد مطالعه در شکل ۱ آورده شده‌است.

و معین مورد بررسی و تحلیل مکانی قرار دادند که روش‌های زمین آماری نسبت به روش‌های معین دقت بالاتری نشان دادند به گونه‌ای که از بین روش‌های زمین آماری، روش کوکریجینگ و از میان روش‌های معین، روش تابع شعاعی از دقتی بالاتر برای بیشتر عامل‌ها برخوردار بود. بارکای و پاسارلا (۲۰۰۸)، جهت تهیه نقشه خطر نیترات در دشت مادنا در ایتالیا از روش‌های زمین آمار و روش‌های شبیه‌سازی استفاده نمودند، نتایج نشان داد که روش کریجینگ گسسته برای مطالعه خطر تخریب کیفیت آب‌های زیرزمینی مناسب است. کرسیک (۱۹۹۷) کریجینگ را به‌عنوان قابل اعتمادترین، قوی‌ترین و گسترده‌ترین روش برای درونیابی و تهیه منحنی‌های تراز آب زیرزمینی می‌داند و عنوان می‌کند که این روش، روش زمین آماری است که در آن واریانس مکانی، موقعیت و توزیع نمونه‌ها مورد ملاحظه قرار می‌گیرد.

هدف از پژوهش حاضر بررسی پراکنش کیفیت

آب‌های زیرزمینی در حوضه آبخیز سلیمان‌شاه در



شکل ۱- موقعیت قرارگیری چاه‌ها در محدوده حوضه آبخیز سلیمان‌شاه و در کشور

غلظت سدیم، کلسیم و منیزیم می‌باشد. محاسبه نسبت جذب سدیم SAR مستلزم اندازه‌گیری غلظت‌های سدیم، کلسیم و منیزیم در آب آبیاری می‌باشد. نسبت جذب سدیم از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد (علیزاده ۱۳۹۲).

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{(Mg^{2+} + Ca^{2+})}{2}}} \quad [1]$$

کلرید  $Cl^-$ : کلرید در کلیه آب‌های طبیعی به غلظت‌های مختلف وجود دارد که تغییرات آن بستگی زیادی به شرایط شیمیایی زمین دارد. به‌ویژه، غلظت نمک در آب‌های اطراف معادن نمک زیاد است. مقادیر زیادی از کلرید از طریق نفوذ مدفوع وارد فاضلاب می‌شود. به‌همین دلیل، هرگاه کلرید همراه با سایر پارامترها ملاحظه شود، مشروط بر اینکه منشأ زمین‌شناختی طبیعی را به حساب نیاورد، می‌توان کلرید را به‌عنوان شاخص آلودگی تلقی کرد. حتی برخی از آب‌هایی که غلظت نمک در آنها معادل ۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد، مزه شور دارند، در حالی که در مورد سایر آب‌های حاوی مقادیر بیشتر یون‌های کلسیم و منیزیم، غلظت تقریبی ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر لازم است. غلظت‌های اضافی کلرید سرعت خوردگی فلزات در سیستم توزیع را بسته به قلیائیت آب افزایش می‌دهد و این می‌تواند به غلظت‌های زیاد فلزات در آب منجر شود. در هر صورت غلظت‌های کلرید متجاوز از ۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر می‌تواند منجر به پیدایش طعم قابل تشخیص در آب شود. غلظت‌های بالای کلرید یک مزه نامطلوب در آب و نوشابه تولید می‌کند. در این تحقیق از روش مور<sup>۳</sup> برای تعیین مقدار کلر در آب استفاده شده‌است (علیزاده ۱۳۹۲).

نیترات: نیترات و نیتریت یون‌هایی هستند که به‌عنوان بخشی از چرخه طبیعی ازت وجود دارند. مقادیر نیترات به‌طور طبیعی در آب‌های زیرزمینی در حد میلی‌گرم در لیتر است. در بسیاری از آب‌های زیرزمینی افزایش

سد مخزنی سلیمان‌شاه نیز در این حوضه و در فاصله ۱۰۲ کیلومتری شهر کرمانشاه و ۱۵ کیلومتری شمال غربی شهر سنقر و ۲ کیلومتری روستای سلیمان‌شاه و بر روی رودخانه گاوه رود احداث شده است و شبکه آبیاری اراضی پایاب سد (دشت سنقر) در غرب شهر سنقر واقع شده است.

## روش پژوهش

در این پژوهش جهت پیش‌بینی پراکنش مکانی چهار ویژگی کیفی آب زیرزمینی شامل: کل املاح محلول (TDS)، نسبت جذبی سدیم (SAR)، کلرید (Cl) و نیترات ( $NO_3$ ) و ارزیابی تغییرات کیفیت آب زیرزمینی منطقه پارامترهای نمونه برداری شده مذکور مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌برداری این پارامترها در سال ۱۳۹۰ از ۶۰ حلقه چاه مورد نظر در منطقه مطالعاتی صورت گرفت. که با توجه به آن می‌توان تغییرات ایجاد شده در کیفیت آب زیرزمینی دشت را مشاهده کرد و تغییرات ایجاد شده را مورد بررسی قرار داد. برای تهیه نقشه ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی منطقه، محدوده مورد مطالعاتی در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10 رسم شد و موقعیت ۶۰ حلقه چاه که نمونه‌برداری از آن صورت گرفته بود روی نقشه مشخص شده (شکل ۱) و نتایج حاصل از تحلیل پارامترهای این چاه‌ها در محیط GIS به هر چاه نسبت داده شده است.

کل جامدات محلول TDS<sup>۲</sup>: مواد محلول آب‌های طبیعی بعد از تبخیر آب به‌صورت ماده جامدی در ظرف تبخیر باقی می‌مانند، که باقی‌مانده تبخیر خوانده می‌شوند و عبارتند از مجموعه مواد معدنی و آلی حل شده در آب که احتمالاً جزیی مواد کلوئیدی موجود در آب نیز به آن اضافه شده‌است (علیزاده ۱۳۹۲).

نسبت جذبی سدیم SAR: سدیمی‌بودن خاک حالت پیچیده‌تری در مقایسه با شوری است، شاخص سدیمی-بودن یک خاک نسبت جذبی سدیم است که وابسته به

<sup>3</sup> Mohr

<sup>2</sup> Total dissolved solids

شرط استفاده از این تخمین‌گر این است که متغیر  $Z$  دارای توزیع نرمال باشد. در غیر این صورت یا باید از کریجینگ غیرخطی استفاده کرد و یا این که با تبدیل‌های مناسب، توزیع متغیر را به نرمال تبدیل کرد. کریجینگ بهترین تخمین‌گر خطی نااریب است و عاری از خطای سیستماتیک می‌باشد. همچنین واریانس تخمین در آن نیز کمینه می‌باشد. در این تحقیق از مدل‌های مختلف روش کریجینگ شامل مدل خطی، گاوس، نمایی، دایره‌ای و کروی استفاده گردید و مناسب‌ترین مدل شناسایی گردید.

### روش IDW<sup>۵</sup>

در این روش برای هر یک از نقاط اندازه‌گیری وزنی براساس فاصله بین آن نقطه تا موقعیت نقطه مجهول در نظر می‌گیرند. سپس این اوزان توسط توان وزن دهی کنترل می‌شود، به طوری که توان‌های بزرگتر اثر نقاط دورتر از نقطه مورد برآورد را کاهش داده و توان‌های کوچکتر وزن‌ها را به‌طور یکنواخت‌تری بین نقاط همجوار توزیع می‌کنند. البته باید توجه داشت که این روش بدون توجه به موقعیت و آرایش نقاط، فقط فاصله آنها را در نظر می‌گیرد، یعنی نقاطی که دارای فاصله یکسانی از نقطه برآورد هستند دارای وزن یکسانی می‌باشند. مقدار عامل وزنی با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌گردد (حسنی پاک ۱۳۸۶):

$$\lambda_i = \frac{D_i - a}{\sum_{i=1}^n D_i - a} \quad [3]$$

که در آن:  $\lambda_i$ ، وزن ایستگاه  $i$  ام،  $D_i$ ، فاصله ایستگاه  $i$  ام تا نقطه مجهول،  $a$ ، توان وزن دهی می‌باشند. در این پژوهش برای ارزیابی تغییرات کیفیت آب زیرزمینی منطقه، پارامترهای نمونه برداری شده شامل کل املاح محلول، نسبت جذب سدیم، کلرید و نیترات مورد استفاده قرار گرفت. نمونه برداری این پارامترها از ۶۰ حلقه چاه مورد نظر در منطقه مطالعاتی صورت

مقادیر نیترات به دلیل توسعه فعالیت‌های کشاورزی مشاهده شده است. غلظت‌ها ممکن است به صدها میلی‌گرم در لیتر برسند. در برخی از کشورها تا ده درصد جمعیت ممکن است از آب آشامیدنی با نیترات بیش از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر (حد استاندارد نیترات) استفاده نمایند. در اثر فعالیت حیاتی باکتری‌ها، آمونیاک ابتدا به نیتریت و سپس به نیترات اکسیده می‌شود و به همین لحاظ مقدار نیترات در غالب آب‌های طبیعی بیش از آمونیاک و نیتریت است. به‌منظور جلوگیری از هرگونه تغییراتی که در تعادل نیترروژنی آب در اثر فعالیت حیاتی باکتری‌ها ممکن است روی دهد، اندازه‌گیری نیترات بلافاصله بعد از اخذ نمونه توصیه می‌شود. اگر امکان اجرای آزمایش در محل نمونه برداری نیست، بهتر این است که نمونه را در ظرف حاوی یخ که حرارت نمونه را به نزدیک نقطه انجماد آب برساند به آزمایشگاه انتقال داده شود (خزاعی و همکاران ۱۳۹۰).

### روش‌های میان‌یابی

#### ۱- روش کریجینگ

کریجینگ عبارت است از یک روش برآورد زمین آماری که بر منطق میانگین متحرک وزن دار استوار می‌باشد و در مورد آن می‌توان گفت که بهترین تخمین‌گر خطی نااریب<sup>۴</sup> (B.L.U.E) است. از مهمترین ویژگی‌های کریجینگ آن است که به‌ازای هر تخمینی خطای مرتبط با آن را می‌توان محاسبه کرد. بنابراین برای هر مقدار تخمین زده شده می‌توان دامنه اطمینان آن تخمین را محاسبه کرد. این تخمین‌گر به‌صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود (حسنی پاک ۱۳۸۶):

$$Z^*(x_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad [2]$$

که در آن:  $Z^*(x_i)$  مقدار متغیر مکانی برآورد شده،  $\lambda_i$  وزن آماری که به نمونه  $x_i$  نسبت داده می‌شود و بیانگر اهمیت نقطه  $i$  ام در برآورد است و  $Z(x_i)$  مقدار متغیر مکانی مشاهده شده در نقطه  $x_i$

<sup>5</sup> Inverse distance weighted

<sup>4</sup> - Best Linear Unbiased Estimator

در نهایت روش مناسب درون‌یابی تشخیص و نقشه تغییرات عامل‌های کیفی به‌گونه جداگانه ترسیم شدند.

### نتایج و بحث

پس از بررسی نرمال بودن داده‌ها که مقادیر حدی آنها به تفکیک هر پارامتر در جدول ۱ ارائه شده است، به‌منظور بررسی ساختار مکانی داده‌ها، اقدام به ترسیم واریوگرام گردید. پس از ترسیم واریوگرام و برازش مدل مناسب بر روی آن، طبق نتایج جدول ۲، مشخصه‌های مربوط استخراج شد. مدل مناسب براساس مجموع مربعات خطا ( $RSS$ ) کمتر و ضریب تبیین ( $R^2$ ) بیشتر انتخاب شد. دقت بالای مدل برازش داده شده می‌تواند نقش به‌سزایی در بالا بردن دقت برآورد داشته باشد. شکل ۳، واریوگرام مربوط به روش کریجینگ را برای هر پارامتر نشان می‌دهند. بعد از آزمایش مدل‌های مختلف با استفاده از شاخص‌های  $RMSE$  و  $ME$  و در نظر گرفتن ساختار فضایی هر یک از مدل‌های برازش داده شده، که در جدول ۳، نشان داده شده مدل مناسب برای درون‌یابی انتخاب شد.

نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه را می‌توان برای ارزیابی ساختار مکانی داده‌ها مورد بررسی قرار داد. وقتی این نسبت کمتر از ۰/۲۵ باشد متغیر مورد نظر دارای ساختار مکانی قوی می‌باشد، بین ۰/۲۵ - ۰/۷۵ ساختار مکانی متوسط و هنگامی که بزرگتر از ۰/۷۵ باشد ساختار مکانی ضعیف است (رابینسون و مترنیچت ۲۰۰۶).

بعد از ارزیابی روش‌های مختلف کریجینگ، از مدل کریجینگ معمولی - نمایی به‌عنوان مناسب‌ترین روش درون‌یابی استفاده شد.

گرفت. که با توجه به آن می‌توان تغییرات ایجاد شده در کیفیت آب زیرزمینی دشت را مشاهده کرد و تغییرات ایجاد شده را مورد بررسی قرار داد.

پس از بررسی نرمال بودن داده‌ها، به‌منظور برازش مدل مناسب، مدل مناسب براساس مجموع مربعات خطای کمتر<sup>۶</sup> ( $RSS$ ) انتخاب شد.

برای بررسی تغییرات مکانی و برآورد کیفیت ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در روش زمین آماری کریجینگ و IDW مورد بررسی واقع شدند و پس از تعیین مناسب‌ترین روش زمین آماری نقشه‌های پهنه‌بندی کیفی در محیط ArcGIS10 ترسیم شدند.

برای انتخاب روش مناسب درون‌یابی جهت تهیه نقشه تغییرات از روش ارزیابی متقابل استفاده شد. در این روش، در هر مرحله یک نقطه مشاهددهای حذف و با استفاده از سایر نقاط مشاهددهای، آن نقطه برآورد می‌شود. این کار برای تمام نقاط مشاهددهای تکرار شد به نحوی که در آخر به تعداد نقاط مشاهددهای برآورد وجود خواهد داشت و در پایان با داشتن مقادیر واقعی و برآورد شده می‌توان خطا و انحراف روش استفاده شده را برآورد کرد. معیارهای گوناگونی برای این کار وجود دارد که می‌توان به ریشه دوم میانگین مربع خطا ( $RMSE$ ) اشاره نمود (جومل و هوایجبرگت ۱۹۷۸، کریج ۱۹۵۱)، که فرمول محاسبه آن به شرح رابطه ۴ است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Z^*(xi) - Z(xi))^2} \quad [4]$$

در این راستا علاوه بر  $RMSE$  از معیار  $ME$  (میانگین خطاها یا میانگین اختلاف بین مقدار تخمین زده شده و مقدار مشاهده شده در نقطه  $i$  ام) نیز استفاده گردید (مرآتی فشی ۱۳۹۰):

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |Z^*(xi) - Z(xi)| \quad [5]$$

جدول ۱- نتایج تجزیه آماری پارامترهای اندازه‌گیری شده آب زیرزمینی (میلی‌گرم بر لیتر).

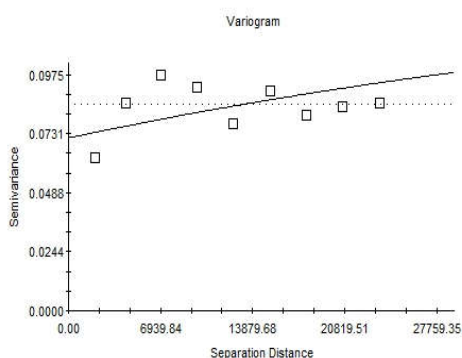
| پارامتر                   | میانگین | بیشترین | کمترین | انحراف معیار |
|---------------------------|---------|---------|--------|--------------|
| کل املاح محلول (TDS)      | ۴۷۴/۰۸  | ۱۴۷۹    | ۷۰     | ۶۴۰/۵۵       |
| نسبت جذبی سدیم (SAR)      | ۰/۴۴    | ۱/۵۷    | ۰      | ۰/۲۹         |
| کلرید (Cl)                | ۱۶/۱۹   | ۱۹/۴۳   | ۱۳/۵۹  | ۱/۶۹         |
| نیترات (NO <sub>3</sub> ) | ۱۳/۴۳   | ۴۱/۱    | ۶/۳۵   | ۵/۰۲         |

جدول ۲- بهترین مدل برازش داده شده به واریوگرام و پارامترهای مربوط به آن.

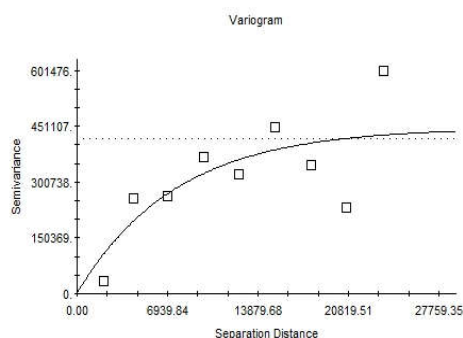
| پارامتر         | میانگین / انحراف معیار | چولگی | کشیدگی | مدل   | اثر قطعه‌ای (Co) | آستانه (Co+C) | شعاع تاثیر | RSS       | R <sup>2</sup> |
|-----------------|------------------------|-------|--------|-------|------------------|---------------|------------|-----------|----------------|
| TDS             | ۴۷۴,۰۸ / ۶۴۰/۵۵        | ۶/۷   | ۴۸/۵۴  | نمایی | ۱۰۰۰             | ۴۴۷۵۰۰        | ۰/۰۰۲      | ۸,۴۹۹E+۱۰ | ۰/۸۶۵          |
| SAR             | ۰/۴۴ / ۰/۲۹            | ۱/۲۷  | ۲/۵۶   | نمایی | ۰/۰۷۱            | ۰/۱۴۳         | ۰/۵۰۰      | ۰/۰۰۱     | ۰/۶۳۰          |
| Cl              | ۱۶/۱۹ / ۱/۶۹           | ۰/۴۱  | -۱/۰۴  | نمایی | ۲/۲۸۲            | ۴/۵۶۵         | ۰/۵۰۰      | ۱/۹۶۰     | ۰/۸۰۵          |
| NO <sub>3</sub> | ۱۳/۴۳ / ۵/۰۲           | ۳/۰۴  | ۱۴/۸۹  | نمایی | ۱۱/۳۹            | ۲۶/۹          | ۰/۴۲۳      | ۱۲/۴      | ۰/۷۱۸          |

جدول ۳- ارزیابی نتایج روش تخمین بر اساس معیارهای RMSE و ME

| روش زمین آمار               | TDS    |       | SAR   |       | Cl    |       | NO <sub>3</sub> |       |
|-----------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|-------|
|                             | ME     | RMSE  | ME    | RMSE  | ME    | RMSE  | ME              | RMSE  |
| میانگین متحرک وزن‌دار (IDW) | ۱۸۱/۹۱ | ۵۰/۳۹ | ۰/۰۷۶ | ۰/۱۷۷ | ۰/۱۷۷ | ۰/۱۷۷ | ۲/۹۲            | ۱/۶۵۱ |
| خطی                         | ۱۸۲/۴۲ | ۵۰/۱۷ | ۰/۰۷۲ | ۰/۱۶۲ | ۰/۱۶۲ | ۰/۱۶۲ | ۲/۶۸            | ۱/۳۱۸ |
| گارس                        | ۱۹۱/۴۴ | ۵۷/۷۳ | ۰/۰۷۲ | ۰/۱۶۳ | ۰/۱۶۳ | ۰/۱۶۳ | ۲/۶۸            | ۱/۳۲۳ |
| کریجینگ معمولی              | ۱۸۱/۹۱ | ۴۴/۷۱ | ۰/۰۷۱ | ۰/۱۶۱ | ۰/۱۶۱ | ۰/۱۶۱ | ۲/۶۷            | ۱/۳۱۶ |
| دایره‌ای                    | ۱۷۹/۸۲ | ۵۰/۴۹ | ۰/۰۷۲ | ۰/۱۶۵ | ۰/۱۶۵ | ۰/۱۶۵ | ۲/۶۸            | ۱/۳۱۷ |
| کروی                        | ۱۸۰/۵۰ | ۴۹/۸۷ | ۰/۰۷۴ | ۰/۱۷۱ | ۰/۱۷۱ | ۰/۱۷۱ | ۲/۶۹            | ۱/۳۱۷ |

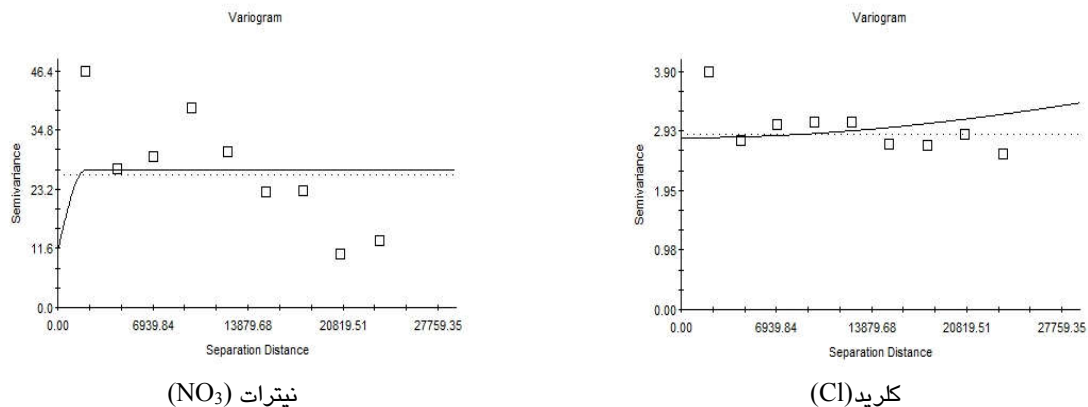


نسبت جذبی سدیم (SAR)



کل املاح محلول (TDS)



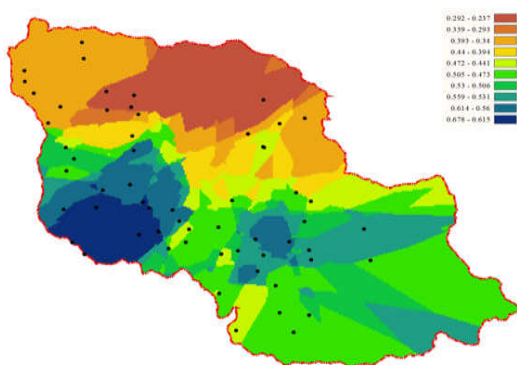
نیترات ( $\text{NO}_3$ )

کلرید (Cl)

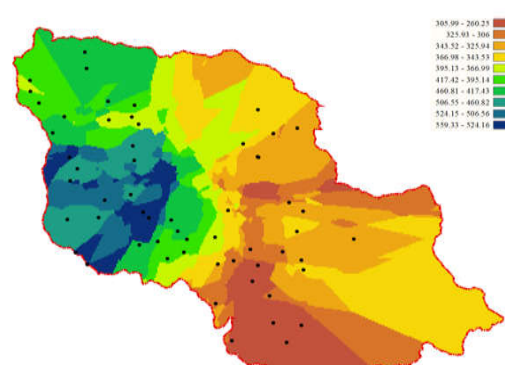
شکل ۲- واریوگرام‌های برازش داده شده پارامترها مربوط به مناسب‌ترین روش زمین آماری کریجینگ معمولی - نمایی.

معرفی کردند. تقی‌زاده و همکاران (۱۳۸۷) به مطالعه تغییرات مکانی شوری آب‌های زیرزمینی با استفاده از زمین آمار پرداختند و روش کریجینگ را به روش IDW ترجیح دادند. احمد (۲۰۰۲) روش کریجینگ را برای برآورد TDS آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار داد و دقت این روش را در برآورد مقادیر غلظت املاح محلول، مناسب تشخیص داد. نقشه‌های پهنه‌بندی کیفی برای هر پارامتر در محیط نرم افزار ArcGIS10 تهیه شد.

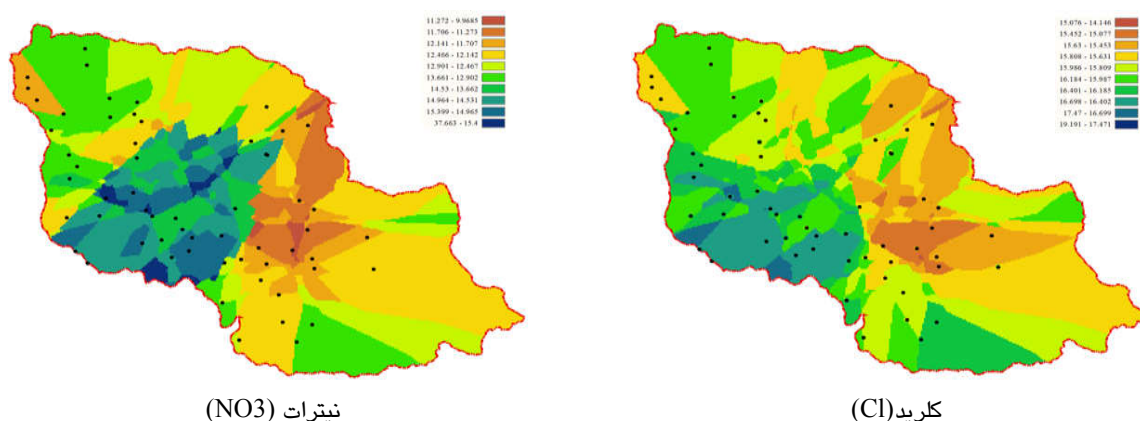
نتایج واریوگرام‌های تجربی و مدل‌های برازش داده شده در شکل ۲، بر داده‌ها نشان می‌دهد که پارامترهای مورد بررسی با مدل نمایی منطبق شدند. هم چنین از جمله تحقیقات اخیر صورت گرفته که نتایج آنها با نتایج این تحقیق همسویی دارد عبارتند از: رضایی و همکاران (۱۳۸۹) به بررسی تغییرات مکانی برخی شاخص‌های کیفی آب‌های زیرزمینی استان گیلان به کمک روش‌های زمین آمار پرداختند و روش کریجینگ معمولی و معکوس فاصله را بهترین روش در درونیابی



نسبت جذبی سدیم (SAR)



کل املاح محلول (TDS)



شکل ۳- نقشه‌های پهنه‌بندی کیفی پارامترهای مورد بررسی.

کودهای نیترا ته و هم‌چنین آبیاری نیز بالا است که مدل نیز به درستی آن را تخمین زد. هم‌چنین در نواحی که مقدار نیترات نسبت به سایر مناطق پایین است میزان فعالیت زراعی و آبیاری نسبت به سایر نقاط کمتر می‌باشد. بر اساس نقشه‌های حاصل می‌توان به‌وضوح متوجه شد که در کدام مناطق فعالیت‌های زراعی بالا است و احتمال آلودگی آب زیرزمینی نیز افزایش دارد.

بررسی کیفیت آب چاه‌های موجود در محدوده جهت شرب انسانی براساس دیاگرام‌های شولر و ویلکاکس نیز مورد بررسی قرار گرفتند، براساس دیاگرام شولر در کل می‌توان نتیجه گرفت که غالب نمونه‌ها از کیفیتی خوب و قابل قبول جهت شرب برخوردارند.

نتایج بررسی کیفیت آب چاه‌های موجود در محدوده جهت مصرف کشاورزی به‌منظور آبیاری براساس دیاگرام ویلکاکس نیز به‌شرح جدول ۴ است. تایج حاصل از بررسی وضعیت کیفی آب چاه‌های موجود در محدوده برای مصارف شرب و کشاورزی در دیاگرام‌های شولر و ویلکاکس ترسیم شده‌اند (شکل ۴ و شکل ۵).

براساس دیاگرام ویلکاکس، غالب نمونه‌ها دارای کیفیت کمی شور - مناسب برای کشاورزی ( $C2-S1$ ) هستند.

همان‌گونه که نقشه‌های پراکنش در شکل ۳، نشان می‌دهند، بیشترین پراکندگی کل املاح محلول، در قسمت شمال و شمال غرب محدوده و بیشترین میزان این پارامتر در مناطق غربی، شمال و شمال غرب محدوده است.

بیشترین پراکندگی نسبت جذبی سدیم، در قسمت شمال و شمال غرب محدوده و بیشترین میزان آن در مناطق غربی و جنوب و جنوب شرق به‌سمت مرکز محدوده می‌باشد. بر اساس نقشه پهنه‌بندی به‌دست آمده برای این پارامتر پراکنش مقادیر نسبت جذب سدیم آب‌های زیرزمینی حوضه آبخیز سلیمان‌شاه نشان می‌دهد که آب‌های زیرزمینی با قلیائیت زیاد نسبت به سایر مقادیر اندازه‌گیری شده در پهنه محدودی گسترش داشته و در غرب محدوده مشاهده می‌شود. با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده و براساس استانداردهای موجود ( $SAR < 10$ ) کلیه چاه‌ها براساس مقادیر SAR در وضعیت عالی قرار دارند. برای پارامتر کلر بیشترین پراکندگی در قسمت غرب به‌سمت شرق محدوده و بیشترین میزان آن در مناطق غربی محدوده است.

بیشترین پراکندگی نیترات مرکز محدوده بوده و بیشترین میزان آن نیز در مناطق غربی و شمال محدوده است. در مکان‌هایی از منطقه مورد بررسی که نیترات بالا است مشخص شد که در آن مناطق میزان مصرف

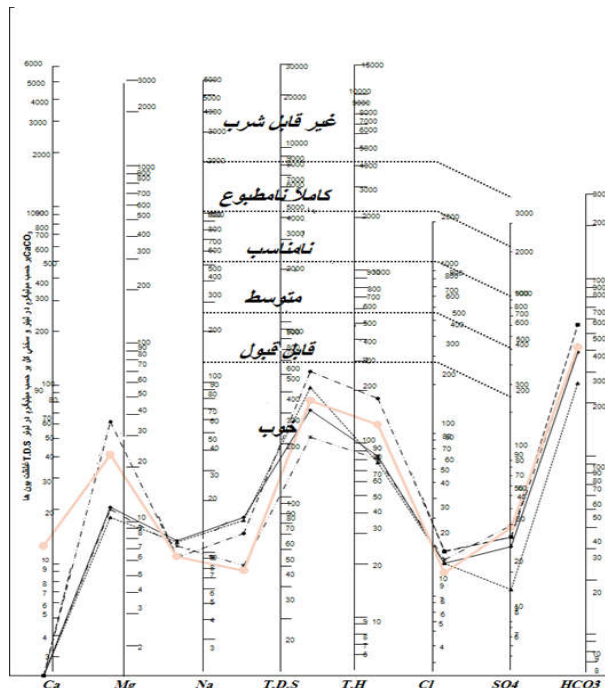
جدول ۴- طبقه‌بندی کیفیت آب نمونه‌های اندازه‌گیری شده براساس دیاگرام ویلکاکس.

| کلاس آب | کیفیت آب برای کشاورزی           | تعداد | درصد  |
|---------|---------------------------------|-------|-------|
| C1-S1   | شیرین - کاملاً بی‌ضرر           | ۴     | ۶/۶۷  |
| C2-S1   | کمی شور - مناسب برای کشاورزی    | ۳۷    | ۶۱/۶۷ |
| C3-S1   | شور - قابل استفاده برای کشاورزی | ۱۷    | ۲۸/۳۳ |
| C4-S1   | خیلی شور - برای کشاورزی نامناسب | ۲     | ۳/۳۳  |

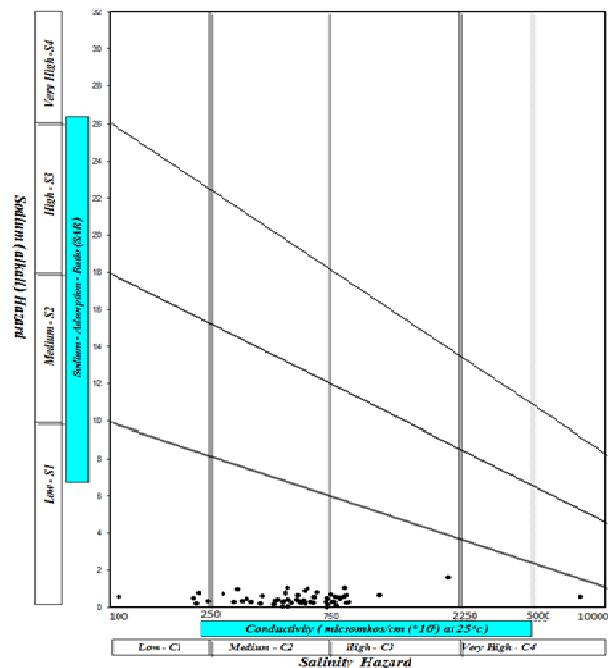
نتیجه‌گیری کلی

تحقیق حاضر نشان داد سیستم اطلاعات جغرافیایی و زمین آمار از قابلیت بالایی برای بررسی توزیع مکانی و پهنه‌بندی آلاینده‌ها و ارزیابی منشأ و منبع آلودگی آب‌های زیرزمینی برخوردار است. در مجموع نتایج این تحقیق نشان داد که انواع روش‌های کریجینگ از کارایی قابل قبولی در تخمین آلودگی نیترات برخوردار است. همچنین در سال‌های اخیر محققان با استفاده از روش‌های زمین آماری مبادرت به تهیه نقشه‌های خصوصیات آب زیرزمینی نموده‌اند. نتایج این

پژوهش نیز نشان داد که روش‌های زمین آماری کارایی قابل ملاحظه‌ای برای تخمین نقاط نامشخص دارد. با به‌دست آمدن نقشه‌های هم-ترازی آلودگی نیترات، مدیران و تصمیم‌گیران در بخش‌های مختلف می‌توانند شناخت بهتری نسبت به وقوع اثرات استفاده گسترده از نهاده‌های کشاورزی داشته باشند. در واقع ابزار تخمینگر می‌تواند به منزله سامانه پشتیبان تصمیم‌گیری و به‌عنوان حلقه‌ای از چرخه ارزیابی اثرات زیست محیطی باشد و کمک مؤثری به مدیران برای تصمیم‌گیری نماید.



شکل ۵- دیاگرام شولر نمونه‌های اندازه‌گیری شده آب زیرزمینی محدوده سلیمان‌شاه.



شکل ۴- دیاگرام ویلکاکس نمونه‌های اندازه‌گیری شده آب زیرزمینی محدوده سلیمان‌شاه.

## منابع مورد استفاده

- ترابی پتکله ص، ۱۳۸۸. مدیریت خشکسالی: تحلیل و پیش‌بینی خشکسالی و اثرات آن در مدیریت منابع آب. رساله دکتری تخصصی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- تقی زاده مهرجردی ر، محمودی ش، خزائی س ح و حیدری ا، ۱۳۸۷. مطالعه تغییرات مکانی شوری آبهای زیرزمینی با استفاده از زمین آمار (مطالعه موردی: رفسنجان). دومین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران، دانشگاه تهران، دانشکده محیط زیست.
- تقی‌زاده مهرجردی ر، زارعیان جهرمی م، محمودی ش، حیدری ا و سرمیدیان ف، ۱۳۸۷. بررسی روش‌های درون‌یابی مکانی جهت تعیین تغییرات مکانی ویژگی‌های کیفی آب‌های زیرزمینی دشت رفسنجان. مجله علوم و مهندسی آب‌بخیزداری ایران، سال ۲، شماره ۵، صفحه‌های ۶۳ تا ۷۰.
- حسینی پاک ع، ۱۳۸۶. زمین آمار (ژئواستاتستیک). انتشارات دانشگاه تهران.
- خزاعی س ح، عباسی تبار ح و تقی‌زاده مهرجردی ر، ۱۳۹۰. پهنه‌بندی آلودگی نترات در آب‌های زیرزمینی استان فارس با استفاده از روش زمین آمار (مطالعه موردی: منطقه سیاح دارنگون). نشریه محیط زیست طبیعی، دوره ۶۴، شماره ۳، صفحه‌های ۲۶۷ تا ۲۷۹.
- رضایی م، دواتگر ن، تاجداری خ و ابولپور ب، ۱۳۸۹. بررسی تغییرات مکانی برخی شاخص‌های کیفی آب‌های زیرزمینی استان گیلان با استفاده از زمین آمار. نشریه آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۵، صفحه‌های ۹۳۲ تا ۹۴۱.
- زهتابیان غ و محمد عسکری ح، ۱۳۸۶. طرح تحقیقاتی بررسی و تحلیل مکانی خصوصیات کیفی آب‌های زیرزمینی درحوزه آب‌خیز گرمسار. دانشگاه تهران.
- علیزاده ا، ۱۳۹۲. رابطه آب و خاک و گیاه. انتشارات دانشگاه امام رضا، چاپ چهاردهم، ۴۷۲ صفحه.
- مرآتی فشی ا، ۱۳۹۰. واسنجی روش‌های دبی-اشل با توجه به فرم بستر در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه قره سو. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه رازی کرمانشاه، دانشکده کشاورزی، ۱۲۷ صفحه.
- معروفی ص، ترنجیان ا و زارع ابیانه ح، ۱۳۸۸. ارزیابی روش‌های زمین آمار جهت تخمین هدایت الکتریکی و PH، زه‌آب‌های آبراهه-ای دشت همدان - بهار. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۱۶، شماره ۲، صفحه‌های ۱۶۹ تا ۱۸۷.
- Barcae 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* 133: 261-273
- Fetouani S, Sbaa M, Vanclooster M and Bendra B, 2008. Assessing groundwater quality in the irrigated plain of Triffa (North-East Morocco). *Agricultural Water Management* 95: 133-142.
- Krige DG, 1951. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical Metallurgical and Mining Society of South Africa* 52:119-139.
- Kresic N, 1997. *Quantitative Solutions in Hydrogeology and Groundwater Modeling*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 464pp, Chicago. 464p.
- Joumel AG and Huijbregts ChJ, 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press, New York.
- Ahmed S, 2002. Groundwater monitoring network design: application of geostatistics with a few case studies from a granitic aquifer in a semi-arid region. In: *Groundwater Hydrology*, Sherif MM, Singh VP and Al-Rashed M (Eds.), Balkema, Tokyo, Japan. 2: 37-57.
- Robinson TP and Metternicht G, 2006. Testing the performance of spatial techniques for mapping soil properties. *Computers and Electronics in Agriculture* 50: 97-108.