

تعیین مقدار کلر آب‌های زیرزمینی، با استفاده از هدایت الکتریکی با روش‌های زمین آمار

(مطالعه موردی چاه‌های آب شرب مشهد)

سیدحسن موسوی‌فضل^۱، علیرضا فرید حسینی^۲ و بیژن قهرمان^۳

(۱) دانشجوی دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) استادیار دانشگاه، فردوسی مشهد.

(۳) استاد دانشگاه، فردوسی مشهد.

*نویسنده مسئول مکاتبات : hmousavifazel@yahoo.com

تاریخ پذیرش: 90/12/01

تاریخ دریافت: 90/08/30

چکیده

اطلاع از غلظت کلر در آب‌های زیرزمینی، برای مصارف شرب و کشاورزی مهم است. اگر غلظت این عنصر در آب بیش از حد باشد، می‌تواند باعث بروز مشکلاتی برای انسان و مسمومیت برای گیاه شود. اندازه‌گیری کلر در آب‌های زیرزمینی در سطح وسیع، پرهزینه و وقت‌گیر است، بنابراین دست‌یابی به روشی آسان و کم‌هزینه‌تر، دارای اهمیت ویژه‌ای است. روش‌های زمین آمار، بر پایه متغیرهای مکانی استوارند. تغییرات این دسته از متغیرها از نقطه‌ای به نقطه دیگر، دارای پیوستگی مشخصی است. این پژوهش به منظور ارزیابی توانایی روش‌های زمین آمار، در تخمین کلر با استفاده از متغیر کمکی هدایت الکتریکی در آب‌های زیرزمینی محدوده شهر مشهد و اطراف آن انجام شد. برای این منظور از 276 حلقه چاه عمیق منطقه، نمونه برداری شد و پارامترهای هدایت الکتریکی و کلر، اندازه‌گیری شدند. داده‌ها با نرم‌افزار جی اس پلاس (GS^+)، تجزیه و تحلیل شدند. برای بررسی همبستگی مکانی داده‌ها، واریوگرام‌های تجربی هر متغیر و واریوگرام متقابل آن‌ها، محاسبه و ترسیم شدند. نتایج نشان داد، پیوستگی خوبی بین پارامترهای اندازه‌گیری شده وجود دارد. ضریب همبستگی دو متغیر، براساس واریوگرام متقابل آن‌ها، 0/91. محاسبه شد. برای هدایت الکتریکی، مدل کروی و برای کلر، مدل گوسین بر مبنای حداقل مقدار RSS به عنوان مناسب‌ترین مدل برازش داده شد. برای مقایسه روش‌های تخمین، از روش ریشه دوم میانگین مربع خطاها (RMSE) و نمودار پراکنش مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی استفاده شد. روش‌های زمین آمار، مقادیر کلر را با دقت بیشتری نسبت به روش‌های IDW و NDW برآورد نمودند.

واژه‌های کلیدی: زمین آمار، میان‌یابی، هدایت الکتریکی، کلر، آب‌های زیر زمینی.

مقدمه

آب‌های زیرزمینی از منابع مهمی هستند که مدیریت آن‌ها دارای اهمیت بالایی دارد. آگاهی از تغییرات کمی و کیفی سفره‌های آب زیرزمینی، به منظور مدیریت بهینه آن‌ها، می‌تواند اطلاعات مهمی را در اختیار مدیران قرار دهد (ولایتی، ۱۳۷۸).

مشخصه‌هایی مانند خصوصیات کیفی آب، عناصر شیمیایی موجود در آب، سطح آب زیرزمینی و بسیاری پارامترهای دیگر در نقاط مختلف، متفاوتند. این پارامترها را که به موقعیت مکانی نقاط بستگی دارند، متغیرهای مکانی می‌گویند.

روش‌های زمین‌آمار، در دهه ۱۹۶۰ ابداع شد. و کاربرد آن‌ها در استخراج معادن و سپس در علوم دیگر، گسترش یافت. تفاوت اصلی این روش‌ها، با آمار کلاسیک، این است که در آمار کلاسیک نمونه‌های گرفته شده از یک جامعه آماری، مستقل از یکدیگر بوده و وجود یک نمونه، هیچگونه اطلاعاتی درباره نمونه بعدی نمی‌دهد. اما روش‌های زمین‌آمار، وجود همبستگی مکانی بین مقادیر یک متغیر در یک ناحیه را بررسی می‌نمایند. روش‌های مختلف زمین‌آمار، بسته به نوع متغیر، دقت متفاوتی دارند. روش‌های زمین‌آمار، به بررسی آن دسته از متغیرهایی می‌پردازند که ساختار مکانی مشخصی دارند (حسنی پاک، ۱۳۷۷).

انتخاب روش مناسب، برای پهنه‌بندی و تهیه نقشه تغییرات خصوصیات کیفی آب‌های زیرزمینی، گامی اساسی و مهم در مدیریت منابع آبی یک منطقه بشمار می‌رود (ولایتی، ۱۳۷۸).

روش‌های میان‌یابی، که برای تهیه نقشه تغییرات کیفیت آب‌های زیرزمینی بکاربرده می‌شوند، شامل روش‌های زمین‌آمار (کریجینگ^{۲۶} و کوکریجینگ^{۲۷}) و روش‌های معین، مانند روش عکس فاصله^{۲۸} (IDW)، فاصله نرمال^{۲۹} (NDW) و تابع شعاعی^{۳۰} (RBF) می‌باشند (رضا زاده و همکاران، ۱۳۸۹).

امینی و همکاران (۱۳۸۱)، روش کریجینگ و کوکریجینگ را برای برآورد غلظت کلر خاک، در اراضی رودشت اصفهان بکار بردند. نتایج نشان داد که هر دو روش کریجینگ و کوکریجینگ، تخمین‌های قابل قبولی را برای برآورد کلر خاک ارائه نمودند. آن‌ها هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک را به عنوان متغیر ثانویه، در روش کوکریجینگ در نظر گرفتند.

Zhang و همکاران در سال ۱۹۹۷، روش کوکریجینگ را برای بهبود تخمین غلظت املاح، در عمق‌های تحتانی خاک با استفاده از اطلاعات شوری لایه‌های فوقانی خاک بکار بردند. نتایج نشان داد که استفاده از روش کوکریجینگ، منجر به کاهش ۳۰ تا ۶۰ درصدی، میانگین مجذورات خطای تخمین^{۳۱} (MSEE)، در افق‌های مختلف خاک شد.

Dagostino و همکاران در سال ۱۹۹۸، به بررسی زمانی و مکانی غلظت نیترات، در آب‌های زیرزمینی پرداختند. در این مطالعه از روش کوکریجینگ و کریجینگ معمولی استفاده شد. نتایج نشان داد که افزایش عدم قطعیت، باعث افزایش میزان واریانس می‌گردد. همچنین کاربرد روش کوکریجینگ، باعث کاهش عدم قطعیت در تخمین غلظت نیترات شده و کاهش هزینه نمونه‌برداری صحرائی و کارهای آزمایشگاهی را در پی دارد.

26. Kriging

27. Cokriging

28. Inverse Distance Weighting (IDW)

29. Normal Distance Weighting

30. Radial Basis Functions (RBF)

31. Mean Squared Estimation Error

زهتابیان و همکاران (1389) تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی را با استفاده از روش‌های زمین‌آمار و معین، بر حسب پارامترهای کاتیون، آنیون، یون سولفات و یون بی‌کربنات مدل‌سازی نمودند. نتایج نشان داد که روش‌های زمین‌آمار، دارای برتری‌های قابل ملاحظه‌ای نسبت به روش‌های معین، در تحلیل مکانی خصوصیات آب‌های زیرزمینی می‌باشند.

Jager در سال 1990 از ابزارهای زمین‌آمار، مثل کریجینگ برای شبیه‌سازی متغیرهای کیفیت آب زیرزمینی استفاده کرد و نتیجه گرفت که کریجینگ، از دیگر ابزارهای زمین‌آمار برای شبیه‌سازی متغیرهای کیفیت آب زیرزمینی بهتر است. Kresic در سال 1997 روش کریجینگ را به عنوان بهترین و قوی‌ترین ابزار، برای درون‌یابی و تهیه منحنی‌های تراز آب‌های زیرزمینی معرفی کرد.

Ahmed در سال 2002 کاربرد روش کریجینگ را در تخمین متغیرهای مکانی کیفیت آب، مثل TDS بکار برد و نتیجه گرفت که کریجینگ، قابلیت بالایی برای تخمین دارد.

Gaus و همکاران (2003) به بررسی غلظت آرسنیک در آب‌های زیرزمینی بنگلادش پرداختند. برای تخمین غلظت و تهیه نقشه مربوطه، از روش کریجینگ گسسته استفاده کردند. نتایج نشان داد که در منطقه مورد مطالعه، 35 میلیون نفر در معرض غلظت بالای آرسنیک (50 میلی‌گرم در لیتر) و 50 میلیون نفر، در معرض غلظت (10 میلی‌گرم در لیتر) می‌باشند. Barcae و همکاران در سال 2008 برای تهیه نقشه خطر نیترات در دشت مادانا ایتالیا، از روش کریجینگ گسسته و روش‌های شبیه‌سازی استفاده نمودند. نتایج نشان داد که روش کریجینگ گسسته، برای مطالعات آب‌های زیرزمینی مناسب است.

یون کلر حاصل از ترکیب کلر با سایر عناصر، مانند کلرید سدیم، کلسیم و منیزیم، به صورت طبیعی در تمام آب‌ها یافت می‌شود. حد مجاز کلر برای آب آشامیدنی، مطابق استانداردهای بین‌المللی بهداشت، 200 تا 600 میلی‌گرم در لیتر و حد مطلوب آن، 500 میلی‌گرم بر لیتر است (کرامتی، 1386). در کشاورزی نیز چنانچه مقدار کلر موجود در آب آبیاری از حد مجاز بیشتر باشد، باعث مسمومیت در گیاه می‌شود. این مشکل در مناطق خشک و نیمه خشک به دلیل شرایط خاص این مناطق، بیشتر خود را نشان می‌دهد. در بین محصولات کشاورزی، درختان میوه، حساسیت بیشتری به کلر دارند. کلر بیشتر از 10 تا 25 میلی‌اکی والان در لیتر، سبب مسمومیت در برخی درختان میوه می‌شود (علیزاده، 1385). اطلاع از وضعیت کلر موجود در آب شرب و کشاورزی، به دلیل ایجاد مسمومیت برای انسان و گیاه، دارای اهمیت زیادی است. از آنجایی که اندازه‌گیری کلر در آب‌های زیرزمینی در سطح وسیع، پرهزینه و وقت‌گیر است، بنابراین دستیابی به روشی آسان و کم‌هزینه‌تر، دارای اهمیت ویژه‌ای است. این تحقیق، با هدف ارزیابی توانایی روش‌های زمین‌آمار در تخمین کلر، با استفاده از متغیر کمکی هدایت الکتریکی، در آب‌های زیرزمینی اطراف شهر مشهد انجام شد.

مواد و روش

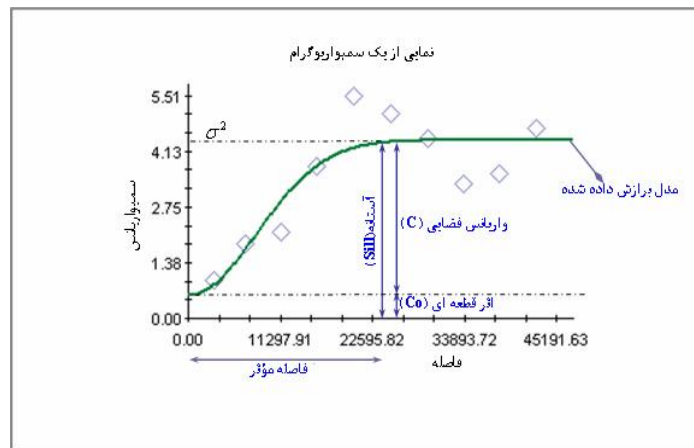
زمین‌آمار

مطالعات زمین‌آمار، شامل 6 مرحله مشخص است. مرحله اول، تعیین جامعه آماری یا محدوده مطالعاتی است. مرحله دوم، تعیین نقاط مشاهده‌ای با پراکندگی مناسب در سطح منطقه و نمونه‌برداری از آن‌ها. مرحله سوم، انجام محاسبات آماری، نرمال کردن و بدست آوردن

نمودارهای توصیفی. مرحله چهارم، رسم واریوگرام تجربی و تعیین ساختار فضایی تئوریک کمیت مورد بررسی. مرحله پنجم، تطبیق مدل استاندارد، برای بدست آوردن پارامترهای واریوگرام تجربی. مرحله ششم، استفاده از روش‌های زمین‌آمار مانند کریجینگ، برای تعیین توزیع کمیت در محدوده مورد مطالعه. (حسنی پاک، 1377).

نیم‌تغییرنما³² (واریوگرام)

تخمین زمین‌آماري متغیرهای مکانی، شامل دو بخش است. بخش اول، شناخت و مدل‌سازی ساختار فضایی کمیت مورد تخمین است که در آن مفهوم پیوستگی، همگنی، ناهمگنی و ساختار فضایی، با استفاده از واریوگرام بررسی می‌شود. بخش دوم، تخمین به روش کریجینگ است که به مشخصات مدل واریوگرام برازش شده در بخش اول، بستگی دارد. مهم‌ترین ویژگی واریوگرام، نسبت به سایر ابزارهای آماری، ساده‌سازی ساختار تغییرپذیری است که موجب کاربرد بسیار وسیع آن، در همه زمینه‌های وابسته به صنعت شده است (حسنی پاک، 1377). واریوگرام یک نمودار، در دستگاه مختصات (XY) می‌باشد (شکل 1). محور Xها، نشان‌دهنده فاصله بین نقاط است که با (h) نمایش داده می‌شود و محور Yها، مقدار واریوگرام را نشان داد (Negreiros et al. 2010).



شکل 1: نیم‌تغییرنما

مقدار واریوگرام از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^n [z(xi) - z(xi+h)]^2 \quad (1)$$

در این رابطه مقدار $\gamma(h)$ نیم تغییرنما، برای جفت نقاطی است که به فاصله h از هم قرار دارند. $n(h)$ تعداد زوج نقاطی است که به فاصله h از هم قرار دارند. $Z(X_i)$ مقدار مشاهده ای متغیر X ، در موقعیت i و $Z(X_i+h)$ مقدار مشاهده ای متغیر، در فاصله h از X_i است.

روش کریجینگ

در حالت کلی، کریجینگ، فرآیند محاسباتی است که در آن، مقدار کمیت یک نقطه نامعلوم، از طریق نقاط معلوم اطرافش محاسبه می‌شود. این روش تخمین، بر منطق میانگین متحرک وزن‌دار، استوار است. کریجینگ، بهترین تخمین‌گر خطی نااریب³³ (B.L.U.E) است. از مهم‌ترین ویژگی‌های کریجینگ آن است که به ازای هر تخمینی، خطای مرتبط با آن را می‌تواند محاسبه نماید. بنابراین برای هر مقدار تخمین زده شده، می‌توان دامنه اطمینان آن تخمین را محاسبه کرد در صورتی که در روش‌های کلاسیک، چنین امکانی وجود ندارد. شکل کلی معادله کریجینگ به صورت زیر است (حسنی پاک، 1377):

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \omega_i(x_0) Z(x_i) \quad (2)$$

در این معادله :

$$\hat{Z}(x_0) \quad \text{مقدار تخمین}$$

$$\omega_i(x_0), i=1, \dots, n \quad \text{وزن نقاط (1 تا n)}$$

$$z_i = Z(x_i) \quad \text{مقدار کمیت در نقاط معلوم (نقاط مشاهده‌ای)}$$

روش کوکریجینگ

همان طوری که در آمار کلاسیک روش‌های چند متغیره برای تخمین وجود دارد، در روش زمین‌آمار نیز می‌توان به کمک روش کوکریجینگ، براساس همبستگی بین متغیرهای مختلف، تخمین زد. این خصوصیت می‌تواند باعث دقت بیشتر تخمین‌ها و صرفه‌جویی در هزینه‌ها (با نمونه‌برداری کمتر) شود. توسعه این روش، بیشتر به دلیل آن است که در بسیاری موارد از یک متغیر، تعداد نمونه کمی در دست است. محل‌هایی که در آن‌ها کمبود نمونه وجود دارد، به کمک متغیرهای ثانویه و با استفاده از همبستگی متقابل بین متغیرهای اصلی و ثانویه، تخمین صورت می‌گیرد. معادله کوکریجینگ به صورت زیر است:

$$Z^*(x_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) + \sum_{k=1}^n \lambda_k U(x_k) \quad (3)$$

در این رابطه، λ_i وزن مربوط به متغیر Z در موقعیت X_i ، وزن λ_k مربوط به متغیر کمکی U در موقعیت X_k .

$$U(X_k) \quad \text{مقدار مشاهده ای متغیر کمکی در موقعیت } X_k$$

محاسبه نیم تغییرنمای متقابل³⁴ برای محاسبه وزن‌ها، به صورت زیر می باشد:

$$\lambda_{zy}(h) = \frac{1}{2} n [Z(x_i + h) - Z(x_i)] \times [Y(x_k + h) - Y(x_k)] \quad (4)$$

که در آن $\lambda_{zy}(h)$ نیم تغییرنمای متقابل بین متغیر Z و Y ، $Z(X_i)$ متغیر مشاهده شده، $Y(X_k)$ متغیر کمکی می باشند. برای معادلات کریجینگ، شروط ناریب بودن و حداقل شدن واریانس تخمین را بایستی اعمال نمود (حسنی پاک، 1377).

اعتبار سنجی تخمین‌ها و انتخاب روش برتر

برای بررسی میزان دقت و اعتبار داده‌های برآورد شده، از روش اعتبار سنجی متقابل³⁵ استفاده می‌شود. با استفاده از این روش، هر یک از نقاط مشاهده‌ای که تنها ابزار مقایسه هستند، با مقادیر تخمین زده شده، مقایسه می‌شوند. بگونه‌ای که یک نقطه به طور موقت، حذف و با استفاده از سایر نقاط و اعمال روش درون‌یابی مورد نظر، برای این نقطه تخمین صورت می‌گیرد. سپس این نقطه به محل خود بر گردانده شده و نقطه بعدی حذف می‌شود. بدین ترتیب برای تمام نقاط، تخمین صورت می‌گیرد (ثقفیان و همکاران، 1390).

معیارهای مختلفی، برای مقایسه مقادیر مشاهده ای و برآورد شده وجود دارد که کاربردی ترین آن‌ها عبارتند از:

الف - میانگین قدر مطلق خطا³⁶ (MAE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z^*(x_i) - z(x_i)| \quad (5)$$

ب - میانگین انحراف خطا³⁷ (MBE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z^*(x_i) - z(x_i)| \quad (6)$$

ج - ریشه دوم میانگین مربع خطاها³⁸ (RMSE)

$$RMSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (z^*(x_i) - z(x_i))^2} \quad (7)$$

34. Cross Variogram

35. Cross Validation

36. Mean Absolute Error

37. Mean Bias Error

38. Root Mean Square Error

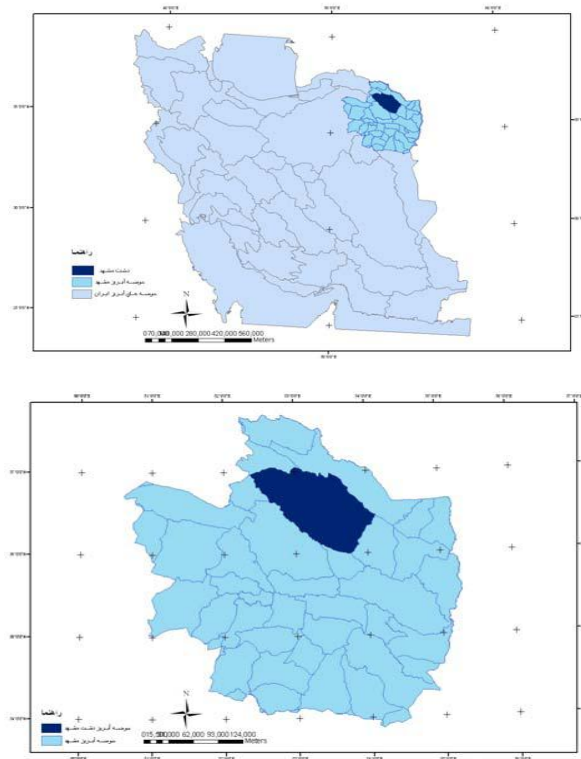
در این روابط $Z^*(X_i)$ مقادیر برآورد شده و $Z(X_i)$ مقادیر داده‌های اندازه‌گیری شده است. هر چه این معیارها کمتر و به صفر نزدیکتر باشند، روش درون‌یابی، دارای دقت بیشتری است.

نمودار پراکنش مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی

در این روش، مقادیر تخمینی و مشاهده‌ای، در مقابل هم رسم می‌شوند. هر چه پراکنش مقادیر، به خط 45 درجه نزدیکتر باشد، نشان‌دهنده برآورد دقیق‌تر روش است. اگر مقادیر مشاهده‌ای، کاملاً برابر مقادیر برآوردی باشد، نقاط، دقیقاً روی خط 45 درجه قرار می‌گیرند. پراکنده‌گی نقاط در اطراف این خط، نشان‌دهنده تفاوت بیش‌تر مقادیر برآوردی با مشاهده‌ای است. اگر تجمع نقاط، در زیر خط 45 درجه باشد (محور Xها مقادیر مشاهده‌ای باشد) بیانگر این است که روش مقادیر را دست‌پایین برآورد کرده است و برعکس (ثقفیان و همکاران 1390).

موقعیت جغرافیایی محدوده‌ی طرح

منطقه مورد مطالعه، چاه‌های تامین آب شرب مشهد، در محدوده شهر و اطراف آن بود. این منطقه، براساس تقسیم‌بندی کشوری در استان خراسان رضوی واقع است. منطقه، دارای طول جغرافیایی 59 درجه و 20 تا 60 درجه و 8 دقیقه و عرض 35 درجه و 40 دقیقه تا 36 درجه و 3 دقیقه واقع است. شکل 1 موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



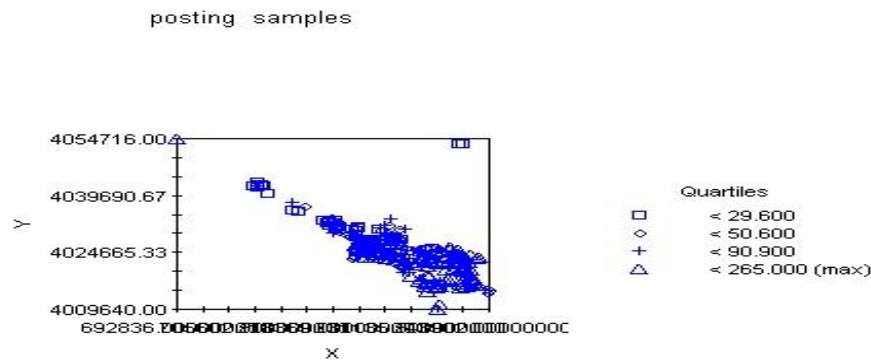
شکل 1: موقعیت منطقه مورد مطالعه.

نمونه‌برداری از منابع آب

برای انجام آزمایشات کیفی چاه‌های منطقه، از ۲۷۶ حلقه چاه عمیق، متعلق به اداره آب و فاضلاب نمونه‌گیری شد. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه، مورد آزمایش قرار گرفت. در این نمونه‌ها، هدایت الکتریکی^{۳۹} با دستگاه هدایت‌سنج (EC متر)، سدیم با دستگاه فلیم‌فوتومتر^{۴۰}، نیترات با روش دی‌آزو (De - Azo)، کلر به روش DPD^{۴۱} تعیین شدند. برای تعیین موقعیت مکانی هر چاه، مختصات جغرافیایی با دستگاه GPS قرائت شد.

پراکندگی نقاط اندازه‌گیری شده

شکل ۲، پراکندگی محل‌های نمونه‌برداری، برای تعیین پارامترهای سدیم، نیترات، کلر و هدایت الکتریکی را بر اساس مختصات جغرافیایی نشان می‌دهد.



شکل ۲: موقعیت نقاط نمونه‌برداری شده.

روش تجزیه و تحلیل داده‌ها

استفاده از روش‌های زمین‌آماري، مستلزم وجود ساختار مکانی، بین داده‌هاست. این موضوع، با تجزیه و تحلیل واریوگرام بررسی می‌شود. شرط استفاده از این تجزیه و تحلیل، نرمال بودن داده‌هاست. برای این منظور، ابتدا تمامی داده‌های مربوط به هر پارامتر، از نظر نرمال بودن بررسی شدند. پس از بررسی آزمون نرمال، داده‌ها با استفاده از نرم افزار GS^+ به روش لگاریتمی نرمال شدند. سپس واریوگرام مربوط به هر پارامتر، با استفاده از نرم افزار GS^+ ^{۴۲} محاسبه و ترسیم شد. در این پژوهش، هدایت‌الکتریکی به عنوان متغیر کمکی (ثانویه) و کلر، متغیر اصلی در نظر گرفته شد. برای پهنه‌بندی کلر موجود در آب از تخمین‌گرهای زمین‌آماري کریجینگ و کوگریجینگ و تخمین‌گرهای عام IDW و NDW^{۴۳} استفاده شد. برای ارزیابی و دقت مدل انتخابی تخمین‌گرهای زمین‌آماري و بررسی خطای میان‌یابی، از تکنیک اعتبارسنجی متقابل، استفاده شد. سپس مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده با یکدیگر، مقایسه، و خطای برآورد با دو

39. Electrical Conductivity

40. Flame Photometer

41. Diethyl-p-Phenylene Diamine

42. Geographic Statistic Software

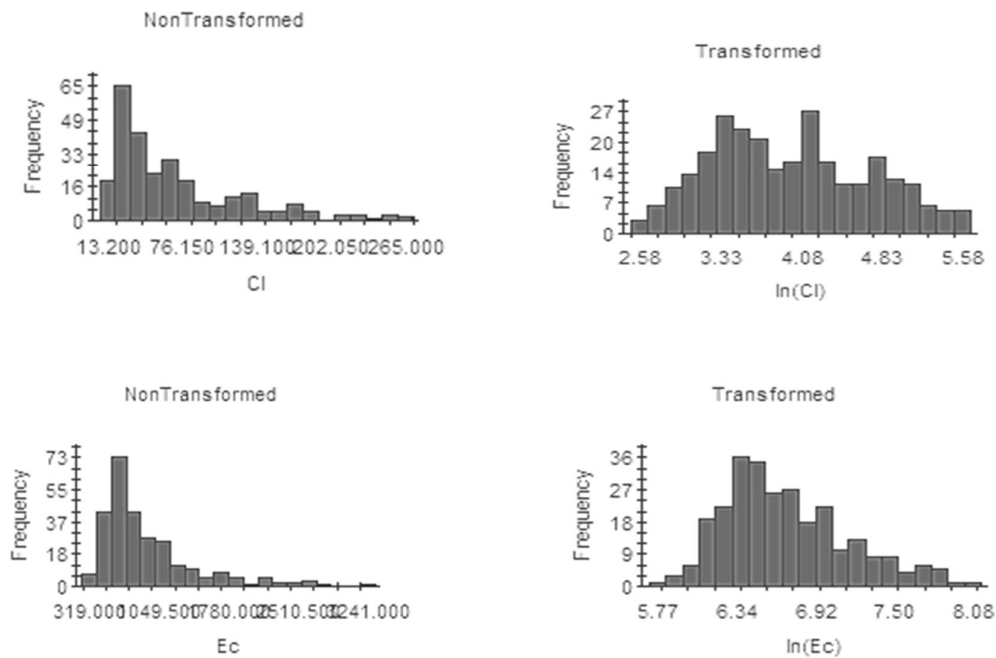
43. Normal Distance Weighting (NDW)

روش آماری ریشه دوم میانگین مربع خطاها (RMSE) و نمودار پراکنش، مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی محاسبه و روش‌های درون‌یابی برتر، تعیین شدند.

نتایج

بررسی وضعیت داده‌ها (نرمال کردن داده‌ها)

یکی از کارهای مهم قبل از انتخاب روش مناسب زمین آمار، بررسی وضعیت داده‌هاست. بدین ترتیب که ابتدا باید دید که آیا داده‌های موجود، از روش نرمال پیروی می‌کنند یا خیر؟ در صورتی که داده‌ها نرمال نباشند، لازم است با استفاده از روش‌های موجود، داده‌ها نرمال شوند. داده‌های این پژوهش، با نرم افزار GS^+ بررسی و با روش لگاریتمی، نرمال شدند. شکل 3، روند نرمال کردن داده‌ها را نشان می‌دهد.



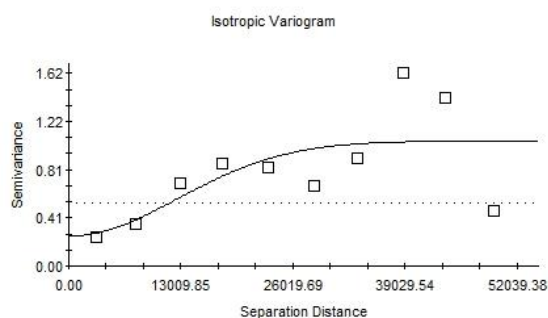
شکل 3: نرمال کردن داده‌ها

رسم واریوگرام تجربی و بررسی ساختار فضایی داده‌ها

پس از بررسی آمار توصیفی داده‌ها که به منظور شناخت بهتر متغیرها انجام می‌گیرد در صورت لزوم، داده‌ها به داده‌های نرمال تبدیل می‌گردند. پس از این گام، لازم است همبستگی مکانی داده‌ها بررسی شود. برای بررسی همبستگی مکانی داده‌ها (وجود یا عدم وجود ساختار فضایی داده‌ها) واریوگرام‌های تجربی، محاسبه و ترسیم شدند (شکل 4 و 5). برای اطمینان از وجود ساختار فضایی و همگنی محیط، واریوگرام‌ها در جهات مختلف رسم شدند. نتایج نشان داد، پیوستگی خوبی در تمام جهات، بین پارامترهای اندازه‌گیری وجود دارد.

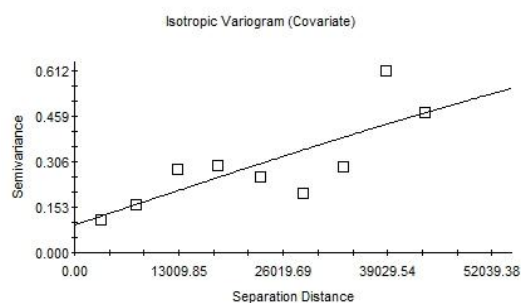
پس از رسم واریوگرام‌ها، مدل‌های مناسب بر آن‌ها، برازش داده شد. بهترین مدل برای متناسب بودن واریوگرام تجربی، بر مبنای حداقل

مقدار RSS⁴⁴ انتخاب شد. مدل گوسین⁴⁵ برای کلر و مدل کروی⁴⁶، برای هدایت‌الکتریکی انتخاب شد (جدول 1)



Gaussian model (Co = 0.2510; Co + C = 1.0510; Ao = 17900.00; r2 = 0.443; RSS = 0.963)

شکل 4: واریوگرام کلر (پارامتر اولیه).



Spherical model (Co = 0.0930; Co + C = 0.8430; Ao = 124600.00; r2 = 0.629; RSS = 0.0716)

شکل 5: واریوگرام هدایت الکتریکی (پارامتر کمکی).

جدول 1: انتخاب مناسب‌ترین مدل برای تجزیه و تحلیل واریوگرام تجربی بر مبنای RSS.

مقدار RSS مدل‌ها			پارامترهای کیفی
گوسین	نمایی	کروی	
** /963	/988	/977	کلر (CL)
/0868	/0822	** /0716	هدایت الکتریکی (EC)

** مدل انتخاب شده

44. Residual Sum of Square

45. Gaussian Model

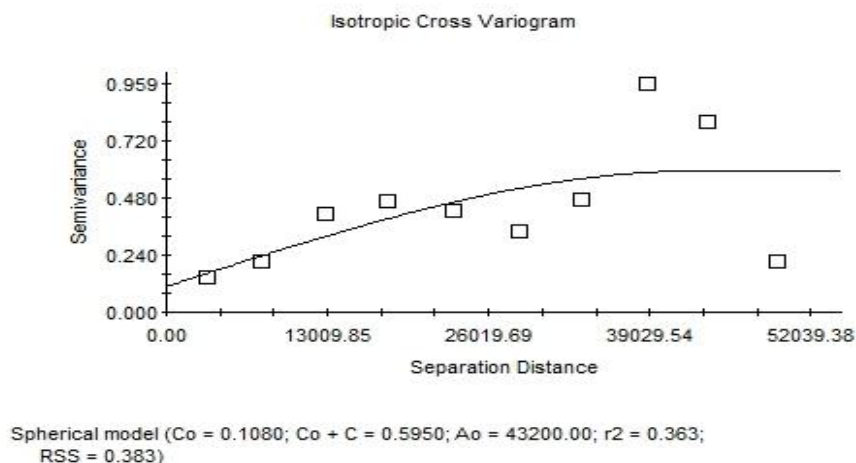
46. Spherical Model

رسم واریوگرام‌ها در جهات مختلف

برای تعیین همسانگردی⁴⁷ و ناهمسانگردی⁴⁸، واریوگرام‌ها در جهات مختلف رسم شدند. چون مقادیر شعاع تاثیر و حد آستانه، تغییری نکردند و تقریباً در تمام جهات یکسان بود، بنابراین، ناهمسانگردی در جهات مختلف وجود نداشت.

واریوگرام متقابل⁴⁹ پارامترهای کلر و هدایت الکتریکی

برای تعیین کواریانس دو متغیر کلر و هدایت الکتریکی، واریوگرام متقابل این دو پارامتر رسم شد (شکل 6). مدل کروی در این حالت، به عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب شد. اثر قطعه‌ای⁵⁰ این واریوگرام، 1080/ و در شعاع تاثیر 43/2 کیلومتر، به سقف⁵¹ رسید (جدول 2). این موضوع، نشان از ارتباط خوب این دو پارامتر دارد. بنابراین، هدایت الکتریکی می‌تواند به عنوان متغیر کمکی در نظر گرفته شود. نسبت اثر قطعه‌ای به سقف که به صورت درصد بیان می‌گردد، می‌تواند به عنوان یک معیار، برای طبقه‌بندی وابستگی مکانی پارامترهای کیفی آب در نظر گرفته شود. اگر این نسبت کمتر از 25% باشد، بدین معناست که متغیر وابستگی مکانی قوی دارد؛ در صورتیکه این نسبت بین 25 تا 75% باشد، وابستگی مکانی متوسط و اگر بیشتر از 75% باشد، متغیر وابستگی بسیار ضعیفی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول 2، پارامترهای کلر و هدایت الکتریکی، دارای ساختار فضایی متوسط بودند. دامنه تأثیر پارامتر کلر، 17/9 و هدایت، 134/6 کیلومتر بدست آمد.



شکل 6: واریوگرام متقابل پارامترهای کلر و هدایت الکتریکی.

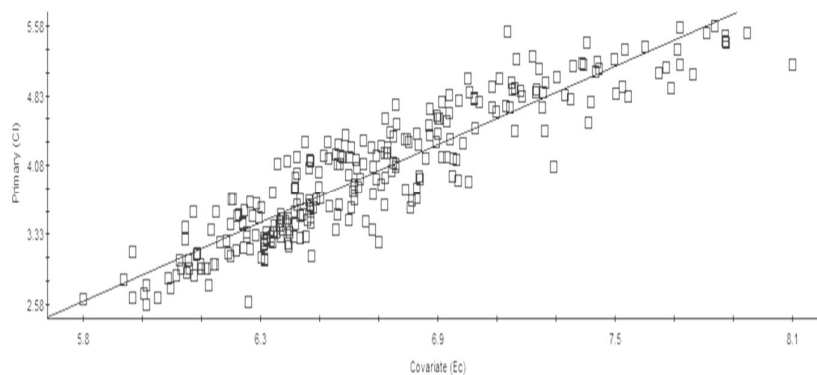
-
- 47 - Isotropic
 - 48 - Anisotropic
 - 49 - Cross Variogram
 - 50 - Nugget Effect
 - 51 - Sill

جدول ۲: مشخصات واریوگرام تجربی برازش داده شده .

مدل	اثر قطعه ای C0 (Nugget)	سقف C0+C (Sill)	شعاع تاثیر A0(km) (Range)	نسبت C/C0+C	ضریب تبیین R2	نوع پارامتر
گوسی	.25100	1/051	17/9	.761	.443	کلر
کروی	.09300	.843	124/6	.890	.629	هدایت الکتریکی
کروی	.110800	.59500	43/2	.818	.363	کلر - هدایت الکتریکی

همبستگی متغیرهای کلر و هدایت الکتریکی

گام اول در استفاده از روش‌های کوریجینگ و کوکوریجینگ، محاسبه و مدل‌سازی واریوگرام هر پارامتر و واریوگرام متقابل آن‌هاست. براساس واریوگرام متقابل بین دو متغیر کلر (متغیر اولیه یا اصلی) و هدایت الکتریکی (متغیر ثانویه یا کمکی) و همچنین کوواریانس بین دو متغیر (شکل ۷)، بین دو پارامتر کلر و هدایت الکتریکی، همبستگی بسیار خوبی وجود داشت (ضریب همبستگی برابر ۰/۹۱). به دلیل وجود همبستگی قوی بین دو متغیر (ضریب همبستگی بزرگتر از ۰/۵)، استفاده از روش کوکوریجینگ در برآورد و تخمین کلر، امکان پذیر شد.



شکل ۷: همبستگی متقابل پارامترهای کلر و هدایت الکتریکی .

اعتبار سنجی برآورد کلر

برای بررسی میزان دقت و اعتبار داده‌های برآورد شده کلر، از روش اعتبار سنجی متقابل استفاده شد. نتایج نشان داد، روش‌های زمین آمار، دارای دقت بیشتر و خطای تخمین کمتری، نسبت به روش‌های IDW و NDW هستند (جدول ۳).

انتخاب روش برتر برای تخمین

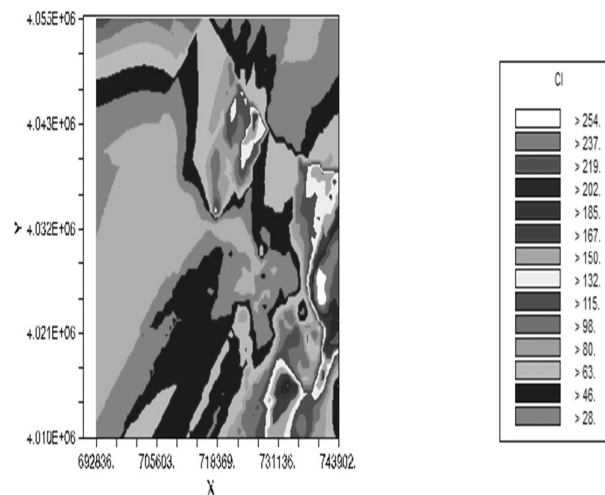
برای مقایسه روش‌های میان‌یابی و انتخاب روش برتر، از دو روش ریشه دوم میانگین مربع خطاها (RMSE) و نمودار پراکنش استفاده شد. نتایج نشان داد که روش کوکریجینگ، دارای کمترین مقدار RMSE و روش NDW بیشترین مقدار بودند. در روش نمودار پراکنش مقادیر برآوردی و مشاهده‌ای نیز، روش کوکریجینگ، دارای ضریب تبیین بالاتر و خطای تخمین کمتری نسبت به سایر روش‌ها بود. (جدول 3)

جدول 3: مقایسه روش‌های میان‌یابی بر مبنای RMSE و نمودار پراکنش

معیار سنجش	NDW	IDW	کریجینگ نقطه‌ای نقطه‌ای	کریجینگ بلوکی	کوکریجینگ
ریشه دوم میانگین مربع خطاها (RMSE)	2/33	2/09	1/48	1/62	1/47
R ² نمودار پراکنش	1/492	1/665	1/708	1/695	1/709
خطای تخمین	1/070	1/052	1/037	1/037	1/037

رسم نقشه‌ها

با توجه به نتایج بدست آمده، روش کوکریجینگ در برآورد مقدار کلر، دقت بیشتری داشت. نقشه کلر آب‌های منطقه مورد مطالعه با استفاده از این روش رسم شد (شکل 8).



شکل 8: نقشه‌ی پهنه بندی کلر (بر اساس روش کوکریجینگ).

بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج بدست آمده از این پژوهش، روش کوکریجینگ، برای تخمین کلر، دقت بالاتری را نسبت به سایر روش‌ها از خود نشان داد. از آنجایی که هدف اصلی در این تحقیق، دسترسی به روشی آسان، سریع و کم هزینه تر برای برآورد مقدار کلر موجود در آب‌های زیرزمینی و رسم نقشه آن در منطقه مورد مطالعه بود تا بتوان با استفاده از پارامتر سهل الوصولی مانند هدایت الکتریکی، که معمولاً به صورت دوره ای برای منابع آب اندازه گیری می شود، این نتیجه حاصل شد. در مواردی که بین دو متغیر، ارتباط علمی و منطقی برقرار بوده و ضریب همبستگی این دو متغیر، بیشتر از ۵/۱ باشد، خطای تخمین در روش کوکریجینگ تا حد بسیار زیادی کاهش می یابد و این روش قابلیت با دقت بالا، برای تخمین پارامترهایی دارد که نمونه کمی از آن‌ها، در دسترس است و یا اندازه گیری آن‌ها، سخت و پرهزینه است. به طور کلی روش‌های زمین آمار به دلیل آنکه بر پایه متغیرهای مکانی استوارند و تقریباً تمامی پدیده‌های طبیعی جزو متغیرهای مکانی هستند، استفاده از این علم می‌تواند برای برآورد و پهنه بندی پارامترهای مکانی و رسم نقشه‌های مربوطه، نتایج نسبتاً دقیقی را ارائه نماید. تهیه نقشه‌های کیفیت آب‌ها، عناصر موجود در آب، سطح آب زیرزمینی، درجه حرارت، بارندگی، سرعت باد، بافت خاک، عناصر شیمیایی و غذایی خاک، و بسیاری از پدیده‌های طبیعی دیگر از آن جمله‌اند. کاربرد زمین‌آمار با توجه به گستردگی و قابلیت‌های بالای آن، در بسیاری از علوم توسعه یافته است، بنابراین استفاده از این علم را به متخصصین علوم آب توصیه می‌نماییم.

سپاسگزاری

از همکاری پرسنل محترم شرکت آب و فاضلاب مشهد به خاطر نمونه برداری و انجام آزمایشات کیفی، همچنین آقای مهندس شاه‌عالمی مدیر عامل محترم این شرکت به دلیل همکاری‌های صمیمانه، تقدیر و تشکر می‌نماییم.

منابع

- امینی، م و همکاران. ۱۳۸۱. مقایسه ی کریجینگ و کوکریجینگ در برآورد غلظت کلر محلول در خاک. مجله علوم و کشاورزی ایران. 4(23): 741-748
- ثقفیان، ب و همکاران. ۱۳۹۰. راهنمای روش‌های توزیع مکانی عوامل اقلیمی با استفاده از داده‌های نقطه ای. نشریه فنی معاونت راهبردی ریاست جمهوری.
- حسنی پاک، ع. ۱۳۷۷. زمین آمار (ژئواستاتستیک). انتشارات دانشگاه تهران.
- رضا زاده، ف. ۱۳۸۹. بررسی آلودگی آب‌های زیر زمینی دشت مشهد به منظور ارزیابی شاخص‌های آب شرب با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی. نخستین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران. کرمانشاه.
- زهتابیان، غ. جان فزا، ع. عسگری، ح و نعمت الهی، م. ۱۳۸۹. مدل‌سازی توزیع مکانی برخی از خصوصیات شیمیایی آب‌های زیرزمینی گرمسار. فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران. 1 (17): 61-73

- **علیزاده، ا.** 1385. طراحی سیستم‌های آبیاری سطحی. انتشارات دانشگاه امام رضا.
- **کرامتی، ح.** 1386. بررسی کیفیت فیزیکی و شیمیایی آب شرب شهر گناباد در فصول بهار و تابستان. مجله افق دانش دانشکده علوم پزشکی گناباد. 3(13)
- **ولایتی، س.** 1378. عوامل موثر بر تغییرات کیفی آبخوان نیشابور، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی 149: 119-139
- **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. Tokyo, Japan. 2: 37-57.
- **Barcae, E and G, Passarella. 2008.** Spatial evaluation of the risk of groundwater quality degradation: A comparison between disjunctive kriging and geostatistical simulation. Journal of Environmental Monitoring and Assessment. 133: 261-273.
- **Dagostino, V., Greene, E., Passarella, G and Vurro, M. 1998.** spatial study of nitrate concentration in groundwater by means of coregonalization. Environmental geology. 36: 285- 295.
- **Gaus, I., Kinniburgh, D.G., Talbot, J.C and Webster, R . 2003.** Geostatistical analysis of arsenic concentration in groundwater in Bangladesh using disjunctive kriging. Environmental Geology 44: 939-948.
- **Jager, N. 1990.** Hydrogeology and groundwater simulation. Lewis Publishers.
- **Kresic, N. 1997.** Hydrogeology and Groundwater Modeling. Lewis Publishers.
- **Negreiros, J., Painho, M., Aguilar, F. and Aguilar, M . 2010.** Geographical information systems principles of ordinary kriging interpolator. Journal of Applied Sciences. 10: 852-867 .
- **Zhang, R., Shouse, P and Yates, S. (1997).** Use of Pseudo- Cross Variogram and Cokriging to improve estimates of soil solute concentration. Soil Sci.Soc. Am. J.61:1342-1347.